Rukopis dr inž. Srđana Jankovića
predstavlja jedinstvenu monografiju
iz oblasti ispitivanja
fizičkih štetnosti u radnoj sredini,
koja se može koristiti kao
pomoć budućim ispitivačima
da što brže i efikasnije savladaju materiju,
ali i kao dopunska literatura
svima ostalima kojima je
ova vrsta znanja potrebna.

Recenzent,
prof. dr Dejan Raković

ISBN 978-9911-9514-0-3

LINEA MEDIA

ISPITIVANJE FIZIČKIH ŠTETNOSTI

U RADNOJ SREDINI

SRĐAN JANKOVIĆ

Srđan Janković

Ispitivanje fizičkih štetnosti u radnoj sredini

LINEA MEDIA, Podgorica

Srđan Janković

Ispitivanje fizičkih štetnosti u radnoj sredini

Recenzent: dr Dejan Raković, prof. u penziji Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu

Izdavač: Linea Media, Miloja Pavlovića 69, Podgorica

Godina izdanja: 2024.

Tiraž: 50

Štampa: Copy Centar d.o.o, Dimitrija Tucovića 42, Beograd

CIP - Katalogizacija u publikaciji
Nacionalna biblioteka Crne Gore, Cetinje

ISBN 978-9911-9514-0-3
COBISS.CG-ID 30249732

Ova publikacija, u celini ili u delovima, može se reprodukovati uz uslov jasnog citiranja izvora.

Predgovor

U savremenom radnom okruženju, precizno merenje fizičkih štetnosti i valjana obrada i tumačenje rezultata predstavljaju ključni aspekt održavanja bezbednosti i usklađenosti sa regulatornim zahtevima.

Ovaj rukopis pokriva četiri značajne fizičke štetnosti prisutne u radnoj sredini: buku, vibracije, toplotno opterećenje i nekoherentna optička zračenja. Za svaku od njih, na jezgrovit način se obrađuju metode merenja, tehnike ispitivanja, potrebna instrumentacija, prateći proračuni i pristupi tumačenju dobijenih rezultata, sa odgovarajućim primerima, kako bi se čitaocu olakšalo razumevanje materije.

Poseban odeljak je posvećen analizi merne nesigurnosti, kao temi od suštinskog značaja za sve aspekte merenja. Detaljno se obrađuju koncepti i metode za određivanje merne nesigurnosti, pružajući čitaocima alate za procenu pouzdanosti rezultata i njihovu interpretaciju u kontekstu regulatornih granica i standarda. Odeljak sadrži razrađene konkretne primere u skladu sa raspoloživom literaturom i međunarodnim preporukama.

Cilj knjige je da pruži stručnjacima za bezbednost i zdravlje na radu, inženjerima, tehničarima i ostalim zainteresovanim čitaocima kratak i jezgrovit pregled teorijskih osnova i praktičnih aspekata ispitivanja fizičkih štetnosti u radnom okruženju. Kako se rukopis zasniva na standardima i regulativi koji se povremeno dopunjuju i menjaju, čitaocima koji se ovom oblašću aktivno bave, sugeriše se da prate ove izmene i prema njima usklade svoj rad.

Autor se zahvaljuje svima koji su pomogli pri izradi ovog rukopisa, pre svega kolegama i prijateljima iz Instituta za medicinu rada Srbije "Dr Dragomir Karajović", gde je stekao znanja iz ove oblasti. Autor se takođe zahvaljuje i dr inž. Stevanu Stankoviću, prof. dr Dragani Šumarac Pavlović, inž. Milovanu Opačiću i Ognjenu Vučiću na korisnim sugestijama i tehničkoj pomoći.

Sadržaj

1. Buka u radnoj sredini 1
1.1. Uvod 1
1.2. Nivo zvučnog pritiska 1
1.3. Frekvencijski sadržaj zvuka, ponderacija 3
1.4. Ekvivalentni kontinualni nivo zvuka i vršna vrednost zvučnog pritiska 6
1.5. Instrumenti za merenje izloženosti buci 7
1.6. Ispitivanje buke prema domaćim propisima i ISO preporukama 9
1.6.1. Strategije ispitivanja buke 9
1.6.2. Nivo dnevne izloženosti buci 11
1.6.3. Nivo nedeljne izloženosti buci 13
2. Vibracije u radnoj sredini 14
2.1. Uvod 14
2.2. Težinske funkcije 14
2.3. Instrumentacija za ispitivanje vibracija 16
2.3.1. Merni lanac 18
2.4. Vibracije koje deluju na celo telo 19
2.4.1. Montaža i povezivanje senzora 20
2.4.2. Osnovni metod ispitivanja 22
2.4.3. Dopunski metodi ispitivanja 24
2.5. Vibracije koje deluju na šaku i ruku 26
2.5.1. Montaža i povezivanje senzora 26
2.5.2. Metod ispitivanja 32
3. Toplotno opterećenje i termalni komfor 36
3.1. Uvod 36

3.2. Metode ispitivanja toplotnog opterećenja 38
3.3. WBGT indeks 39
3.4. Predviđeno toplotno naprezanje 41
3.4.1. Parcijalni pritisak vodene pare 43
3.4.2. Srednja radijantna temperatura 44
3.5. Indeksi termalnog komfora PMV i PPD 44
3.6. Domaća regulativa 46
4. Nekoherentna optička zračenja 47
4.1. Uvod 47
4.2. Postupak ispitivanja 49
4.2.1. Iradijansa i radijantna ekspozicija 49
4.2.2. Efektivna iradijansa i efektivna radijantna ekspozicija 52
4.2.3. Radijansa i efektivna radijansa 54
4.3. Merna instrumentacija 59
5. Merna nesigurnost 62
5.1. Uvod 62
5.2. Izvori merne nesigurnosti 62
5.3. Raspodele verovatnoće 63
5.3.1. Normalna raspodela 63
5.3.2. Uniformna raspodela 68
5.3.3. Trougaona raspodela 69
5.4. Standardna devijacija i standardna devijacija srednje vrednosti 70
5.5. Standardna nesigurnost 71
5.5.1. Kombinovana standardna nesigurnost 72
5.5.2. Budžet merne nesigurnosti 74
5.5.3. Propagacija nesigurnosti 75

5.6. Primeri izračunavanja merne nesigurnosti 78
5.6.1. Merna nesigurnost pri merenju buke 78
5.6.2. Merna nesigurnost pri merenju vibracija 82
5.6.2.1. Merna nesigurnost ubrzanja 82
5.6.2.2. Merna nesigurnost trajanja radne operacije 86
5.6.2.3. Merna nesigurnost dnevne izloženosti vibracijama A(8) ... 87
5.6.3. Merna nesigurnost WBGT – korelisane ulazne veličine 89
5.6.3.1. Nesigurnost WBGT pri direktnom solarnom zračenju 93
Bibliografija 95

1. Buka u radnoj sredini

1.1. Uvod

Zvuk čine varijacije vazdušnog pritiska koje se prostiru u obliku longitudinalnog talasa. On nastaje kada neki predmet, npr. membrana zvučnika ili površina mašine, osciluje i tako naizmenično sabija i širi okolni vazduh. Može nastati i kada su varijacije pritiska posledica rada neke mašinske komponente, npr. ventilatora ili mlaznog motora.

Zvuk se kroz vazduh prostire brzinom od oko 343 m/s pri standardnim uslovima temperature i pritiska. Najjednostavniji zvuk je sinusnog oblika i karakterišu ga frekvencija i amplituda. Ovakav zvuk se naziva osnovni (čist) ton. Složeni ton sadrži više osnovnih tonova. Frekvencija tona izražava se u hercima (Hz) i predstavlja broj varijacija pritiska u sekundi (frekvencija sinusnog talasa). Niži tonovi imaju manju frekvenciju i veće talasne dužine, a viši tonovi veću frekvenciju i manje talasne dužine. Talasna dužina je rastojanje između dva uzastopna vrha talasa i izračunava se kao $\lambda = v/f$, gde je λ [m] talasna dužina, v [m/s] brzina zvuka, a f [Hz] frekvencija. Amplituda zvuka je najveći otklon od ravnotežnog pritiska odn. maksimalna promena pritiska u toku jednog ciklusa talasa i određuje jačinu zvuka.

Buka u radnoj sredini je svaki neželjen ili štetan zvuk koji ometa rad ili ugrožava zdravlje, pre svega sluh. U većini slučajeva, buka se sastoji od većeg broja komponenti različitih frekvencija.

1.2. Nivo zvučnog pritiska

Ljudsko uho je veoma osetljiv i prilagodljiv organ koji može da registruje veoma male i veoma velike promene pritiska u vazduhu. Najmanja amplituda promene pritiska koju može da registruje je 20 μPa (mikropaskala), što je oko pet milijardi puta manje od normalnog atmosferskog pritiska. Sa druge strane, ljudsko uho toleriše zvučni pritisak koji je milion puta veći od 20 μPa, što odgovara granici bola. Da bi se merio

zvučni pritisak u tako širokom rasponu, korišćenje jedinice za pritisak Paskal (Pa) bilo bi nepraktično i nepregledno. Zato se uvodi jedinica decibel (dB), čija skala je logaritamska i koja za referentni nivo ima p_0 = 20 μPa (formula 1.1).

$$L_p = 10\,log_{10}\left(\frac{p}{Po}\right)^2 = 20\,log_{10}\left(\frac{p}{Po}\right) \tag{1.1}$$

Ova skala bolje odgovara ljudskoj percepciji relativne jačine zvuka, koja je takođe logaritamska, pa je dB "prirodna" mera za veličinu L_p koju nazivamo *nivo zvučnog pritiska* (engl. sound pressure level, SPL). Iz formule vidimo da varijacija pritiska od p = 20 μPa (prag čujnosti) odgovara nivou zvučnog pritiska L_p = 0 dB, a svako množenje zvučnog pritiska sa 10 odgovara dodavanju 20 dB. Na primer, 200 μPa je 20 dB, 2000 μPa je 40 dB, a 20.000.000 μPa je 120 dB. Tako je opseg od 20 μPa do 20 miliona μPa "sabijen" u samo 120 dB.

U formuli se koristi kvadrat pritiska, koji je proporcionalan energiji koju talas nosi. Kada se ova energija preda čulu sluha, može izazvati njegovo oštećenje. Veličina koja se koristi za opisivanje energije zvučnog talasa naziva se *intenzitet zvuka*. Po definiciji, to je energija koju zvučni talas nosi u jedinici vremena kroz jediničnu površinu talasnog fronta [1].

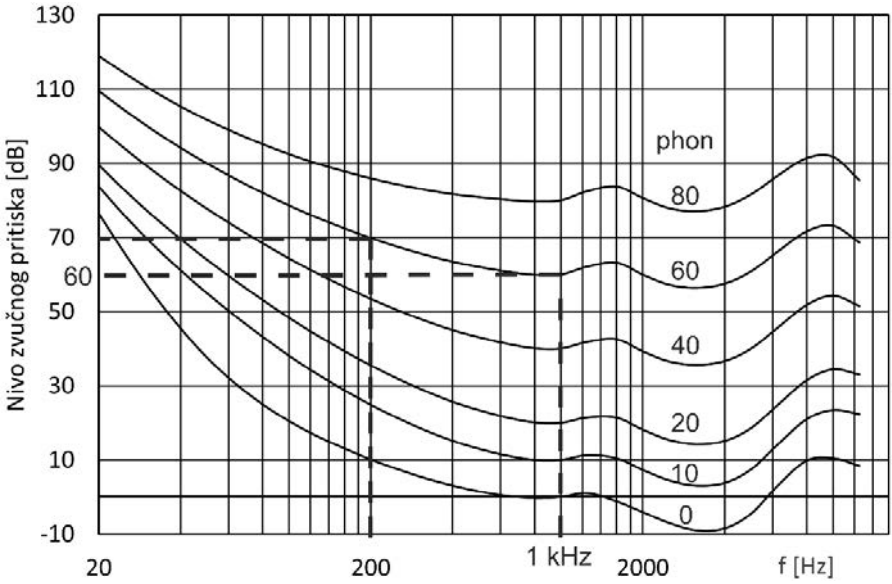
Upotreba decibela dolazi uz određena ograničenja. Doprinose pojedinih izvora buke u dB nije moguće direktno sabirati. Ukoliko je, na nekom mestu, nivo buke od jednog izvora L_1, a od drugog L_2, ukupni nivo buke izračunava se primenom formule 1.2.

$$L_{ukupno} = 10\log\left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}}\right) \tag{1.2}$$

Tako je, recimo, za L_1 = 78 dB i L_2 = 80,6 dB, ukupni nivo buke L_{ukupno} ≈ 82,5 dB.

1.3. Frekvencijski sadržaj zvuka, ponderacija

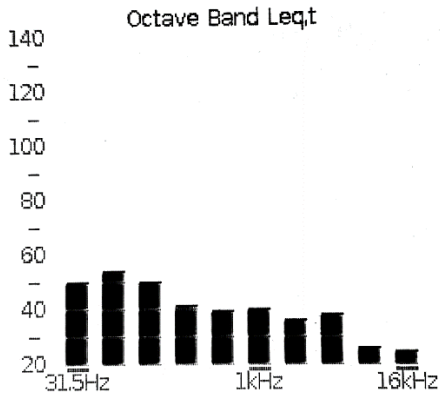
Ljudsko uho registruje opseg frekvencija od približno 20 Hz do 20 kHz i opseg zvučnog pritiska od 0 dB (granica čujnosti) do preko 120 dB (granica bola), ali nije jednako osetljivo na sve frekvencije. Subjektivni doživljaj jačine zvuka naziva se *nivo glasnosti* (engl. loudnes level) i izražava se u fonima (phon). Dogovorno je usvojeno da nivo glasnosti u fonima na frekvenciji od 1 kHz bude istovetan sa objektivnim nivoom zvuka u dB. Osetljivost na ostale učestanosti se može pronaći na osnovu krivih jednake glasnosti, tzv. izofonskih krivih (engl. „equal loudness contours“). One pokazuju nivo zvučnog pritiska potreban da se zvuk posmatrane frekvencije čuje jednako glasno kao zvuk od 1 kHz. Ove krive su prikazane na Slici 1.1 i definisane su u ISO 226 [2]. Sa dijagrama vidimo da zvuk od 60 dB, frekvencije 1 kHz, dogovorno odgovara 60 phon. Prateći istu krivu, koja odgovara glasnosti od 60 phon, vidimo da ton frekvencije 200 Hz mora imati nivo od 69,9 dB da bismo ga registrovali kao jednako glasan kao 60 dB na 1 kHz.



Slika 1.1. Krive jednake glasnosti (izofonske linije).

Na osnovu ovih saznanja, instrumenti za merenje nivoa buke koriste elektronske filtre koji pojačavaju ili slabe izmereni nivo zvuka, zavisno od njegove frekvencije, imitirajući na taj način ljudski sluh. Kada se ovo učini, neophodno je naznačiti da je izvršeno filtriranje signala i koji filter (ponderacija) je korišćen. U praksi se koriste tzv. A-filter (A-ponderacija) za opštu buku i C-filter za merenje vršnog zvučnog pritiska. A-ponderisani rezultat se izražava u jedinicama dB(A) ili, kraće, dBA. Ovime se postiže da izmereni nivo buke od npr. 70 dB(A) zvuči jednako glasno bez obzira na frekvencijski sadržaj.

Ukoliko je ipak potrebno izvršiti detaljniju analizu frekvencijskog sadržaja zvuka, najčešće se koriste oktavna, 1/3-oktavna i Furijeova analiza. Ove metode daju spektralni sadržaj odn. raspodelu energije zvuka po različitim frekvencijama. Oktavna i 1/3-oktavna analiza dele ceo posmatrani opseg frekvencija na podopsege koji se nazivaju oktave i terce. Oktava je opseg frekvencija čija je najviša frekvencija dvostruko viša od najniže, a svaka oktava se može dodatno podeliti na tri terce. Terca je tada opseg frekvencija čija je najviša frekvencija 1,26 puta veća od najniže. Primer oktavne analize dat je na Slici 1.2.



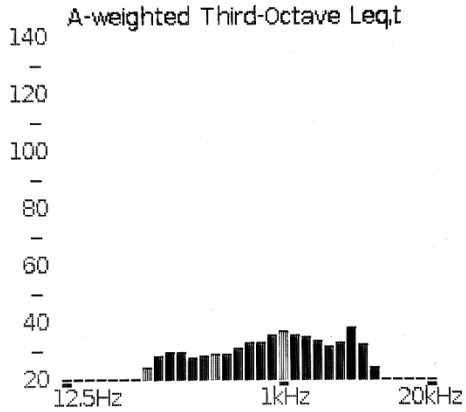
Slika 1.2. Oktavna analiza na ekranu instrumenta Cirrus CR:171C .

Svaka oktava ima svoju centralnu frekvenciju koja je geometrijska sredina najniže i najviše frekvencije u oktavi:

$$f_c = \sqrt{f_{min} \cdot f_{max}}$$

Tako, recimo, oktava čija je centralna frekvencija f_c = 1 kHz obuhvata opseg od približno f_{min} = 707 Hz do f_{max} = 1414 Hz.

Kada se posmatrani opseg frekvencija podeli na oktave, dobija se relativno gruba slika spektra. Ukoliko je potrebna bolja rezolucija, koristi se 1/3-oktavna analiza, a za još bolju rezoluciju se koristi Furijeova analiza, obično primenom algoritma brze Furijeove transformacije (FFT). Primer 1/3-oktavne analize dat je na Slici 1.3.



◀ Third Octave Review ▶

A-weighted Third-Octave Leq,t

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
12.5	---	160	26.9	2k	32.8
16	---	200	28.0	2.5k	30.9
20	---	250	28.5	3.15k	32.2
25	---	315	28.7	4k	37.7
31.5	6.3	400	30.2	5k	31.5
40	12.1	500	32.1	6.3k	23.9
50	19.5	630	32.3	8k	19.8
63	23.8	800	34.9	10k	15.7
80	27.7	1k	36.6	12.5k	13.2
100	28.9	1.25k	35.3	16k	12.1
125	29.1	1.6k	34.3	20k	12.6

Slika 1.3. 1/3-oktavna analiza na ekranu instrumenta Cirrus CR:171C. Levo: grafički prikaz; desno: numerički prikaz.

Treba imati u vidu da je frekvencijska osa u oktavnoj i 1/3-oktavnoj analizi logaritamska, dok je u Furijeovoj linearna. To znači da je, u 1/3-oktavnoj analizi, npr. razmak na frekvencijskoj osi od 125 Hz do 250 Hz isti kao razmak od 250 Hz do 500 Hz. Ovakva analiza je precizna na niskim frekvencijama, a postaje vrlo neprecizna na visokim. Furijeova analiza u celom opsegu frekvencija ima jednaku preciznost, a skala je linearna: razmak od 125 Hz do 250 Hz je duplo manji od razmaka između 250 Hz i 500 Hz. U praksi

ispitivanja buke u radnoj sredini, uglavnom se koriste oktavna i 1/3-oktavna analiza, koje su implementirane u firmware-u profesionalnih instrumenata.

1.4. Ekvivalentni kontinualni nivo zvuka i vršna vrednost zvučnog pritiska

U toku radnog procesa, nivo zvuka varira. U odeljku 1.2 videli smo da predavanje akustičke energije čulu sluha može izazvati njegovo oštećenje. Zato nas interesuje da pronađemo *ekvivalentni kontinualni nivo zvuka* L_{eq}. To je nepromenljivi nivo koji je, po energetskom sadržaju, ekvivalentan snimljenom zvuku [3]. Drugim rečima, stvarno snimljen zvuk, čiji nivo varira u toku snimanja, po energetskom sadržaju je isti kao da je sniman nepromenljivi nivo L_{eq}. U praksi ispitivanja buke u radnoj sredini, obično se L_{eq} odnosi na A-ponderisani nivo, pa se to ponekada označava kao $L_{A,eq}$, a ponekada se A-ponderacija naznačava tako što se rezultat izrazi u jedinicama dB(A).

Ukoliko je, u posmatranom ukupnom vremenu snimanja T, nivo zvuka najpre bio L_1 u trajanju t_1, a zatim L_2 u trajanju t_2, onda L_{eq} možemo naći primenom sledeće formule:

$$L_{eq} = 10log\frac{t_1 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}} + t_2 \cdot 10^{\frac{L_2}{10}}}{T} \tag{1.3}$$

Na sličan način se može naći ekvivalentni nivo za proizvoljan broj vremenskih intervala. U praksi se često dešava da nivo dosta varira, pa se koriste instrumenti koji u toku merenja sve vreme uzimaju uzorke nivoa buke i softverski izvode navedeno usrednjavanje.

U pojedinim situacijama može doći do kratkotrajnog izlaganja velikim nivoima zvučnog pritiska, pa je, pored ekvivalentnog kontinualnog nivoa, od interesa i vršna vrednost zvučnog pritiska p_{peak}. To je najveća apsolutna vrednost trenutnog zvučnog pritiska registrovana tokom posmatranog vremenskog intervala. Pošto je C-filter skoro ravan u najvećem delu opsega akustičkih frekvencija i tu ne menja mnogo neponderisani nivo L_p, referentni

nivoi p_{peak} se mogu približno preračunati na C-ponderisane vrednosti nivoa zvučnog pritiska izražene u dB(C) primenom formule 1.1. Tako se dobija da p_{peak} = 140 Pa približno odgovara nivou L_p = 137 dB(C), što je granična vrednost prema domaćim propisima [4].

1.5. Instrumenti za merenje izloženosti buci

Merači nivoa zvuka za ambijentalni monitoring i lični dozimetri za personalni monitoring, prikazani na Slici 1.4, predstavljaju dve najčešće vrste instrumenata za merenje izloženosti buci u radnoj sredini.

Slika 1.4. Instrument za ambijentalno merenje nivoa zvuka (levo) i lični dozimetar (desno).

Oba pristupa imaju svoje prednosti i nedostatke, a izbor zavisi od svrhe i konteksta merenja, vrste posla koji ispitanik obavlja, kao i raspoloživosti instrumentacije. Kada god je to moguće, preporučuje se korišćenje obe metode u kombinaciji, radi sveobuhvatne procena izlaganja.

Instrument za ambijentalni monitoring zvuka je uređaj koji meri trenutni nivo zvučnog pritiska na određenoj lokaciji. Drži ga ispitivač u ruci, simulirajući uticaj prisustva ispitanika, ili je montiran na poseban stativ i prikazuje rezultat na ekranu, zavisno od mernog scenarija. Profesionalni instrumenti ove vrste imaju memoriju, mogućnost primene različitih frekvencijskih ponderacija (A, C, Z), frekvencijske analize različite rezolucije, izračunavanja L_{eq}, L_p i brojne dodatne funkcije. Takođe, prema domaćim propisima [4], ispitivanje buke u radnoj sredini se vrši u skladu sa ISO 9612 prema kojem ovi instrumenti, uključujući mikrofon i pripadajuće kablove, treba da ispunjavaju zahteve IEC 61672-1 za instrumente klase 1 ili klase 2, pri čemu je poželjno koristiti uređaje klase 1 [5].

Lični dozimetar za buku je uređaj koji meri kumulativnu izloženost radnika buci tokom određenog vremenskog intervala (celo radno vreme, delovi radnog vremena kada je izloženost buci značajna i sl.). Ispitanik ga nosi pričvršćenog na radnu odeću i snima se nivo zvučnog pritiska u nivou uha. Dozimetar izračunava ekvivalentni kontinualni nivo zvuka L_{eq}, a u zavisnosti od izvedbe, i druge parametre (npr. $L_{p,max}$, procenat dozvoljene granice izlaganja prema određenom standardu i sl.). Pojedini modeli samo memorišu trenutne izmerene vrednosti, a naknadna obrada se vrši računarski, nakon prenosa podataka u odgovarajuću aplikaciju.

Lični dozimetri su pogodniji i reprezentativniji za ispitivanje individualne izloženosti buci tokom dužih vremenskih perioda, koji predugo traju da bi ispitivač primenio ambijentalni monitoring. Dozimetar uzorkuje sve vreme ispitivanja, pa uzima u obzir i varijacije u nivou buke, koje se dešavaju neočekivano kada proces rada nije jednoličan. Pogodni su i kada se ispitanik, u toku procesa rada, dosta kreće i menja svoj položaj u odnosu na izvore buke. Koriste se bez direktnog angažovanja ispitivača. Skuplji su, zahtevaju složenije održavanje i mogu da ometaju rad ili funkcionisanje lične zaštitne opreme. Pošto nisu pod nadzorom ispitivača sve vreme tokom dugotrajnog

merenja, podložni su zloupotrebama od strane ispitanika, ali i nenamernim lažnim očitavanjima (npr. kad se merni mikrofon tare o odeću).

Instrumenti za ambijentalno merenje nivoa zvuka su manje specijalizovani, pa time i svestraniji i fleksibilniji. Mogu snimiti vršne nivoe i frekvencijske spektre zvuka kao i brojne dodatne parametre. Ugrađeni firmver i bolji interfejs obično nude više mogućnosti od onih koje imaju dozimetri, pa se sama merenja mogu obaviti brže, ekonomičnije i lakše. Međutim, manje su reprezentativni za individualnu izloženost buci, jer ne uzimaju u obzir trajanje i udaljenost od izvora buke, već se ti faktori moraju notirati i uzeti u obzir u obradi rezultata od strane ispitivača.

1.6. Ispitivanje buke prema domaćim propisima i ISO preporukama

Ispitivanje buke u radnoj sredini se, u našoj zemlji, vrši u skladu sa Pravilnikom o preventivnim merama za bezbedan i zdrav rad pri izlaganju buci [4]. Fizički parametri koji se koriste su:

- **vršna vrednost zvučnog pritiska** − maksimalna vrednost "C" frekvencijski ponderisanog trenutnog zvučnog pritiska;
- **nivo dnevne izloženosti buci** $L_{A,EX,8h}$ − vremenski i frekvencijski ponderisana srednja vrednost nivoa izloženosti buci za osmočasovno radno vreme i
- **nivo nedeljne izloženosti buci** $L_{A,EX,8h,5d}$ − vremenski i frekvencijski ponderisana srednja vrednost nivoa izloženosti buci za radnu nedelju od pet osmočasovnih radnih dana.

Kao i kod većine drugih fizičkih štetnosti, domaći propisi su prilagođeni EU direktivama. U slučaju buke, u pitanju je direktiva 2003/10/EC [6].

1.6.1. Strategije ispitivanja buke

Prema članu 7 domaćeg Pravilnika [4], ispitivanje se obavlja u skladu sa standardom ISO 9612 [5]. Nakon obilaska radnih prostorija i snimanja

procesa rada, ispitivač se odlučuje za jednu od tri strategije definisane standardom:

1. Ispitivanje zasnovano na radnim zadacima (engl. task-based)
2. Ispitivanje zasnovano na vrsti posla (engl. job-based)
3. Celodnevno ispitivanje

Prva strategija je pogodna kada se rad sastoji od reprezentativnih zadataka (radnih operacija) koji stvaraju sličan nivo buke iz istih izvora, pa se za svaki zadatak vrše posebna merenja nivoa zvučnog pritiska. Da bi ovakva ispitivanja bila validna, potrebno je da nema velikih odstupanja od jednog do drugog radnog dana u pogledu broja i obima identifikovanih radnih operacija, kao i da iste radne operacije, kada se ponavljaju, ne stvaraju previše različite nivoe buke. Primer bi bila stolarska radionica u kojoj tri različite radne operacije stvaraju značajno izlaganje buci i ova situacija će, u nastavku, biti detaljnije razrađena.

Druga strategija je zasnovana na identifikovanju grupa zaposlenih koje su relativno homogene po izlaganju buci, što se sreće kada rade istu ili sličnu vrstu posla, pa su približno jednako izloženi istim izvorima buke, u približno istom trajanju. Kod ove strategije nije potrebna detaljna analiza radnih operacija, već se zasniva na uzimanju nekoliko slučajnih uzoraka nivoa zvučnog pritiska po predefinisanim grupama. Kako se slučajnim uzimanjem uzoraka mogu izostaviti kratkotrajna izlaganja velikim nivoima buke, ova strategija se ne preporučuje ako su takva izlaganja prepoznata. Ovaj pristup je pogodan za uštedu vremena ispitivača, kada god je moguće identifikovati grupe relativno homogene po izloženosti, a analiza pojedinačnih radnih operacija je suviše složena ili nepotrebna. Primer bi bio proizvodni pogon u kome su glavni izvori buke pneumatski konvejeri, a u istim prostorijama, na srodnim poslovima rade inženjeri i tehničari.

Treća strategija se sastoji iz merenja nivoa zvučnog pritiska tokom čitavog radnog dana. Zaposleni tipično nosi lični dozimetar koji sve vreme uzorkuje nivo buke. Ukoliko nije moguće obezbediti da zaposleni nosi dozimetar tokom čitavog radnog vremena, reprezentativnost uzorkovanja se obezbeđuje tako što se pokrivaju svi periodi značajno visokog izlaganja. Ovaj

pristup je pogodan kada je teško definisati reprezentativne zadatke, homogene grupe po izlaganju i, uopšte, bilo kakve ponovljive i reprezentativne obrasce izlaganja. Manjkavost je u dugom vremenu ispitivanja da bi se pokrio takav proces rada, kao i nemogućnosti ispitivača da sve vreme nadzire merenje, što otvara mogućnost da dođe do slučajne ili namerne nereprezentativnosti rezultata, naročito vršne vrednosti zvučnog pritiska (mehanički udari u mikrofon i drugi artefakti). Ovo iziskuje da se celodnevno merenje ponovi više puta, da bi se identifikovali i eliminisali artefakti, što ovaj pristup čini neekonomičnim.

1.6.2. Nivo dnevne izloženosti buci

Radi ilustracije izračunavanja nivoa dnevne izloženosti buci $L_{A,EX,8h}$, posmatraćemo primer radionice u kojoj se, analizom procesa rada, ispitivač opredelio za strategiju ispitivanja zasnovanog na radnim zadacima. Identifikovane su tri karakteristične radne operacije koje značajno doprinose izlaganju: bušenje, sečenje i ravnanje, a preostalo vreme je nivo buke relativno nizak.

Trajanje merenja treba da bude dovoljno da bude reprezentativno za radnu operaciju koja se ispituje. Prema ISO 9612, Za svaki zadatak se vrši najmanje tri merenja, a ukoliko se rezultati razlikuju za 3 dB(A) ili više, vrši se tri ili više dodatnih merenja. Ako je trajanje radne operacije kraće od 5 min, trajanje merenja je jednako trajanju operacije. Za duže zadatke, trajanje merenja je najmanje 5 min.

U slučaju buke koja se ciklično ponavlja, merenje treba da pokrije trajanje najmanje tri dobro definisana ciklusa [5]. Na primer, ako se koristi brusilica, koja stvara buku tokom rada, pa se isključuje, svako uključenje, rad i isključenje predstavlja jedan ciklus. Ukoliko tri ciklusa zajedno traju kraće od 5 min, potrebno je merenjem obuhvatiti dodatne cikluse tako da merenje ukupno traje najmanje 5 min.

Nivo buke u toku rada bez značajnog izlaganja se beleži kao poseban zadatak i ocenjuje se pomoću nekoliko uzoraka. U našem primeru, ocenjeno je da nivo buke tada ne prelazi 67 dB(A). Poštujući napomene iz prethodnih

paragrafa, izvršena su po tri merenja za svaku od preostalih radnih operacija. U slučaju sečenja (zadatak 3), prve tri dobijene vrednosti razlikuju se za više od 3 dB(A), pa su izvršena dodatna tri merenja. Rezultati su prikazani u sledećoj tabeli:

Tabela 1.1. Izmereni nivoi zvučnog pritiska.

Radna operacija/zadatak	**Trajanje**	**Izmereni nivoi zvučnog pritiska $L_{eq,i}$ [dB(A)]**		
1. Rad bez značajne buke		≤ 67		
2. Bušenje	1 h do 3 h	78,2	80,1	79,9
3. Sečenje	2 h do 4 h	85,2	91,7	88,6
		90,2	87,3	89,3
4. Ravnanje	1 h do 2 h	81,1	82,5	80,8

Kada raspolažemo sa N merenja ekvivalentnog nivoa zvuka L_{eq} za neki zadatak m, ekvivalentni nivo za ceo taj zadatak možemo izračunati primenom sledeće formule [5]:

$$L_{eq,m} = 10log\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} 10^{0,1\cdot L_{eq,i}}\right) \tag{1.4}$$

U konkretnom slučaju, za zadatak m=2 (bušenje), imamo *N*=3 merenja, pa je ekvivalentni nivo za taj zadatak:

$$L_{eq,m=2} = 10log\left(\frac{1}{3}(10^{0,1\cdot 78,2} + 10^{0,1\cdot 80,1} + 10^{0,1\cdot 79,9})\right) = 79,48\ dB(A)$$

Na isti način se, za zadatak 3 (sečenje), gde imamo N=6 merenja, dobija $L_{eq,m=3}$ = 89,18 dB(A), a za zadatak 4 (ravnanje) $L_{eq,m=4}$ = 81,53 dB(A). Za ostatak vremena, bez značajne buke (zadatak 1), možemo usvojiti najnepovoljniju procenu $L_{eq,m=1}$ = 67 dB(A).

Pošto su izračunati ekvivalentni nivoi za zadatke *m* = 1, 2, 3 i 4, nivo dnevne izloženosti buci se može izračunati primenom ranije prikazane formule 1.3 uopštene za onoliko vremenskih intervala koliko ima zadataka:

$$L_{A,EX,8h} = 10log\left(\sum_{m=1}^{M}\frac{T_m}{T_0}10^{0,1\cdot L_{eq,m}}\right)$$

Ovde je T_0 referentni period (uzima se 8 h radno vreme), a T_m je prosečno trajanje zadatka *m*. U našem primeru, imamo *M* = 4 zadatka:

$$L_{A,EX,8h} = 10log\left(\frac{1.5}{8}\cdot 10^{0,1\cdot 67} + \frac{2}{8}\cdot 10^{0,1\cdot 79,48} + \frac{3}{8}\cdot 10^{0,1\cdot 89,18} + \frac{1.5}{8}\cdot 10^{0,1\cdot 81,53}\right)$$

$$L_{A,EX,8h} = 85{,}6\ dB(A)$$

1.6.3. Nivo nedeljne izloženosti buci

U situacijama kada se nivo dnevne izloženosti značajno menja od jednog do drugog radnog dana, usrednjavanje se vrši na više radnih dana [4], primenom sledeće formule:

$$\bar{L}_{A,EX,8h,D} = 10log\left(\frac{1}{D}\sum_{d=1}^{D}10^{0,1\cdot L_{A,EX,8h,d}}\right)$$

Ovde je D ukupan broj dana za usrednjavanje, a $L_{A,EX,8h,d}$ je nivo dnevne izloženosti buci u toku dana *d*. Uobičajeni nedeljni nivo izloženosti dobija se usvajanjem D=5 radnih dana u nedelji.

2. Vibracije u radnoj sredini

2.1. Uvod

Mehaničke vibracije predstavljaju oscilatorno kretanje tela oko ravnotežnog položaja pod dejstvom spoljašnjih sila. Predstavljaju čestu fizičku štetnost u oblastima industrije gde se koriste snažne mehaničke mašine, ručni vibrirajući alati ili prevozna sredstva. Energija vibracija u ljudsko telo ulazi preko dela tela koji je u kontaktu sa vibrirajućom površinom, pa se merenje njihovog dejstva vrši na tim tačkama. U tom smislu se zasebno tretiraju:

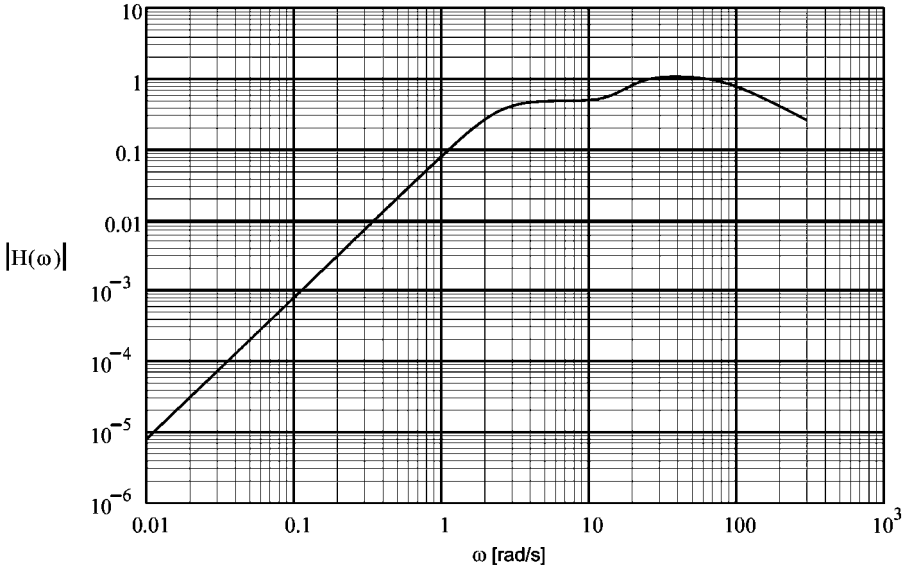
- **vibracije koje deluju na celo telo** (engl. WBV – „whole body vibration“) koje se javljaju kada je celo telo oslonjeno na vibrirajuću površinu, kao što je sedište ili pod, i
- **vibracije koje deluju na šaku i ruku** (engl. HAV – „hand-arm vibration“) koje se javljaju kada su šaka i ruka u kontaktu sa vibrirajućim alatom, opremom ili predmetom mehaničke obrade.

Osnovne fizičke veličine koje se koriste za opisivanje vibracija su ubrzanje a[m/s^2] i frekvencija f[Hz]. Mere se instrumentima za merenje ubrzanja opremljenim senzorima koji se nazivaju **akcelerometri**. Od interesa je odrediti ukupnu energiju koju je ljudsko telo primilo, jer je ova energija izazivač oštećenja. U tu svrhu se koristi tzv. **efektivna (RMS) vrednost ubrzanja**, koja je proporcionalna energiji vibracija koja je ušla u ljudsko telo.

2.2. Težinske funkcije

Pošto različite frekvencije (učestanosti) vibracija imaju različitu sposobnost da izazovu određeni efekat štetan po zdravlje, koristi se frekvencijska **ponderacija**: izmerene komponente određenih frekvencija se oslabljuju, dok se druge naglašavaju. U tu svrhu se koriste tzv. **težinske funkcije** $H(s)$. Ovo su funkcije kompleksne promenljive s=jω gde je j imaginarna jedinica (j^2=–1), ω=$2\pi f$ je kružna učestanost u rad/s, a f je učestanost u Hz. Magnituda $|H(s)|$, zapravo funkcija učestanosti $|H(\omega)|$, pokazuje relativnu osetljivost organizma na različite učestanosti vibracija.

Konkretna težinska funkcija zavisi od toga koji se štetni efekat posmatra, u kojoj osi deluju vibracije i da li je reč o WBV ili HAV. Na Slici 2.1 prikazana je jedna takva težinska funkcija koja se, prema ISO 2631-1 [7], koristi za vibracije koje deluju na celo telo, u sedećem položaju.



Slika 2.1. Težinska funkcija za procenu rizika po zdravlje ispitanika u sedećem položaju, izloženog vibracijama u vertikalnoj (z) osi.

Težinske funkcije su date u relevantnim standardima (ISO 2631 grupa standarda za WBV i ISO 5349 grupa standarda za HAV). težinska funkcija *H(s)* u ISO standardima prikazana je kao funkcija prenosa u *s*-domenu, pa je potrebno ili da instrument ima već implementiran odgovarajući filtar (ukoliko je proizvođač specifično namenio sistem za ispitivanje dejstva vibracija na ljude prema ovim standardima) ili je potrebno snimiti signal vibracija bez ponderacije, pa naknadno izvršiti softversku obradu. Ponderacija (tretman težinskom funkcijom *H(s)*) se postiže množenjem kvadrata modula komponenata kompleksnog spektra snimljenog signala, odgovarajućim vrednostima $|H(\omega)|^2$ [8]:

$$a_{w,RMS} = \sqrt{2 \sum_{n,n>0} |H(\omega_n)|^2 \cdot |F_n|^2}$$

Detaljan opis ove procedure, sa primerom realizacije, dat je u literaturi [9, 10]. U slučaju da se koristi namenski sistem, poput Bruel&Kjaer tip 4447, korisnik odn. operater ne vrši ponderaciju računski, već ju je proizvođač realizovao u okviru instrumenta.

2.3. Instrumentacija za ispitivanje vibracija

Najčešće korišćeni senzor za merenje vibracija je **akcelerometar** – pretvarač koji neposredno generiše signal proporcionalan ubrzanju koje se meri. Poželjno je da akcelerometar bude što manje mase i dimenzija, kako bi što manje ometao ispitivanje, kao i da istovremeno detektuje vibracije u sve tri ose. Primer takvog akcelerometra prikazan je na Slici 2.2.

Slika 2.2. Troosni piezoelektrični akcelerometar.

U praksi se najčešće koristi piezoelektrični akcelerometar, zasnovan na inercijalnom elementu (tegu) određene mase *m* i kristalu sa piezoelektričnim svojstvima. Prilikom ubrzavanja *a* po ispitivanoj osi, inercijalni element deluje na piezoelektrični kristal silom $F=m \cdot a$. Tom prilikom se na njemu stvara naelektrisanje (piezoelektricitet) koje se dalje pojačava i obrađuje. Ovaj tip akcelerometra, u odnosu na ostale, ima dobre frekvencijske karakteristike (relativno širok propusni opseg), dobar

dinamički opseg, dobru linearnost i relativno malu ukupnu masu. Za razliku od potenciometarskih i induktivnih, nema pokretnih delova podložnih habanju i ne zahteva napajanje, već generiše sopstveno naelektrisanje. Količina generisanog naelektrisanja je vrlo mala, što iziskuje vrlo osetljiv i precizan pojačavač naelektrisanja.

Proizvođači se često odlučuju da osnovni senzor dopune pretpojačavačem, koji je smešten zajedno sa njim u kućištu i napaja se preko priključnog kabla, kojim se istovremeno prenosi i signal vibracija koje se mere. Kabl se vezuje za instrument za ispitivanje vibracija, kao što je namenski uređaj prikazan na Slici 2.3.

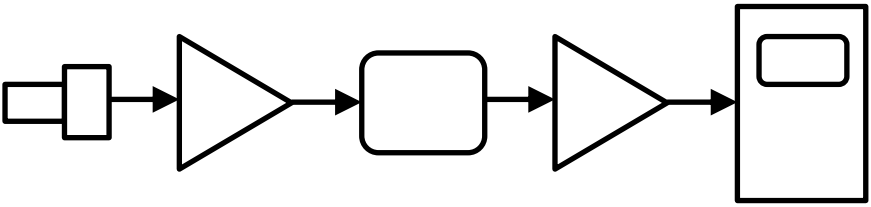
Slika 2.3. Instrument za ispitivanje humanih vibracija Bruel&Kjaer tip 4447.

Ovakav namenski uređaj nosi osoba čije se izlaganje vibracijama ispituje, što pojednostavljuje merenje, ali takvi sistemi ne poseduju mogućnost vizuelizacije samog signala vibracija, ni mogućnost merenja apsolutne amplitude, već samo ponderisane vrednosti, koja uzima u obzir vrstu vibracija (vibracije koje deluju na šaku/ruku ili na celo telo) pa odatle uključuju odgovarajući filtar za ponderaciju. Ispitivač zato ne raspolaže informacijom o vremenskom obliku signala vibracija odn. njegovom frekvencijskom sadržaju, kao ni informacijom o amplitudi i neponderisanoj efektivnoj vrednosti ubrzanja: instrument direktno filtrira signal, u skladu sa

relevantnim ISO standardima, dajući težinski tretiranu vrednost iz koje se može izračunati dozvoljeno dnevno vreme izlaganja [8].

Postoje i drugačije realizacije mernih lanaca za ispitivanje humanih vibracija, npr. platforme opšte namene, koje se za ovu vrstu ispitivanja prilagođavaju zasebnim izborom pogodnih adaptera, akcelerometara, pretpojačavača i softvera. Ova alternativa obezbeđuje veću fleksibilnost i kontrolu nad akvizicijom i obradom signala, ali zahteva veći stepen obučenosti operatera i merenja su komplikovanija za izvođenje u praksi. Kod takvih sistema, lakše je otkriti greške i kvarove poput loše povezanog ili defektnog priključnog kabla, ali veća složenost procedure ispitivanja povećava mogućnost greške operatera u izvođenju merenja i naknadne obrade.

2.3.1. Merni lanac



Slika 2.4. Uprošćeni šematski prikaz mernog lanca za ispitivanje vibracija.

Na Slici 2.4 je šematski prikazan tipičan merni lanac za ispitivanje vibracija. Akcelerometarski senzor (Akc) se pričvršćuje na površinu gde se mere vibracije (tačka ulaska energije vibracija u ljudsko telo). Signal se pojačava pretpojačavačem (PP) i propušta kroz filter (F), kojim se realizuje odgovarajuća težinska funkcija (ponderacija), a potom se ponovo pojačava (P), uzorkuje, snima i očitava pomoću instrumenta (INS). Kako se ispitivanje vibracija simultano obavlja u sve tri ose, merni sistem se sastoji iz tri identična merna lanca, koji vode ka instrumentu, ili je akcelerometarski senzor realizovan kao troosni, pojačavači su trokanalni i sl. što zavisi od načina kako je proizvođač realizovao sistem u praksi.

Postoje i drugačije realizacije ovog mernog lanca, npr. sistem može biti bez filtra (F), tako da instrument snima neizmenjeni signal vibracija. Frekvencijska ponderacija, pomoću odgovarajućih težinskih funkcija, obavlja se u samom instrumentu (INS) npr. pomoću brze Furijeove transformacije (FFT) nakon koje se frekvencijski spektar tretira funkcijom *H(s)* ili nekom drugom pogodnom metodom. Ovaj pristup postao je popularan razvojem brzih i jeftinih procesora koji se mogu integrisati u instrumente. Međutim, čak i u takvoj realizaciji, instrumentacija mora imati filtre za potiskivanje šuma.

2.4. Vibracije koje deluju na celo telo

Ispitivanje vibracija koje deluju na celo telo (WBV) vrši se prema standardu ISO 2631-1 [7] kako je to propisano domaćim pravilnikom [11]. Koordinatni sistem, za stojeći i sedeći položaj, usvaja se na način prikazan na Slici 2.5. Akcelerometar se montira na tački ulaska vibracione energije u ljudsko telo.

Slika 2.5. Koordinatni sistem za ispitivanje vibracija koje deluju na celo telo.

Trajanje merenja (uzorkovanja) treba da bude reprezentativno za izlaganje vibracijama tj. da obuhvati čitav ciklus izlaganja. Prema ISO-2631-1, za

signale koji se ne menjaju značajno u vremenu, minimalno vreme uzorkovanja je 108 s [7], ali se preporučuje da bude znatno duže. U literaturi [12] se preporučuje trajanje od najmanje 20 min, po potrebi izdeljeno na reprezentativne intervale od po 3 min.

2.4.1. Montaža i povezivanje senzora

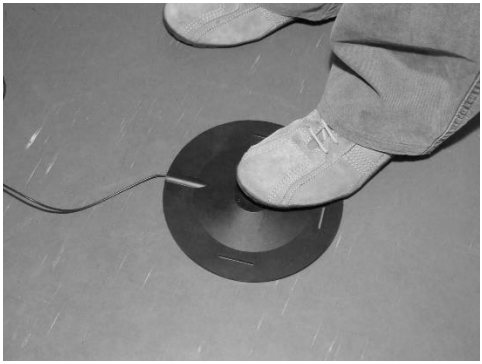
Za ispitivanje vibracija koje deluju na celo telo, najčešće se koristi okrugla gumena podloška sa ugrađenim troosnim akcelerometrom. Za sedeći položaj, ona se horizontalno postavlja na sedište vozila, kao što je prikazano na Slici 2.6. Kada osoba sedne, podloška se fiksira između nogu bez potrebe za dodatnim vezivanjem. Dovoljno je da se zauzme udoban položaj, obezbedi da je podloška opterećena težinom tela i da se ne pomera tokom merenja. Pošto su x i y ose jednake po težinskim faktorima, kabl se može sprovesti bilo gde, birajući orijentaciju koja neće ometati vožnju ili oštetiti opremu.

Slika 2.6. Horizontalno postavljanje podloške kod merenja WBV u vozilu.

Kada je potrebno meriti vibracije u nivou leđa, koje se prenose preko naslona, pretvarač se fiksira posebnim kaišem pre nego što vozač/operater zauzme sedeći položaj, kako je prikazano na Slici 2.7. U ovim situacijama, koordinatne ose se reorijentišu prema Slici 2.5. Pošto z-osa ima različite težinske faktore od x i y osa, instrument treba podesiti tako da uzme u obzir ovu razliku. Ako se signal vibracija snima za kasniju analizu, neophodno je zabeležiti orijentaciju koordinatnih osa u odnosu na položaj akcelerometra, kako bi se mogli odabrati odgovarajući težinski faktori.

Slika 2.7. Postavljanje pretvarača kod merenja vibracija u nivou leđa.

Kada se ispituju vibracije koje deluju na stojećeg ispitanika, poput operatera mašinom čije vibracije se prenose preko poda, akcelerometar se montira na pod pored stopala. Postoji nekoliko načina za njegovo fiksiranje: ušrafljivanjem u malu rupu na podu, lepljenjem pčelinjim voskom ili cijanoakrilatnim lepkom preko adaptera, ili korišćenjem specijalnog magneta. Ako ovi načini nisu mogući, može se koristiti podloška na koju ispitanik postavi stopalo, kao što je prikazano na Slici 2.8, pri čemu treba voditi računa da sprega bude što bolja tj. da naleganje stopala bude dobro.



Slika 2.8. Postavljanje pretvarača kod merenja WBV u stojećem položaju.

Bez obzira na način montaže, važno je zabeležiti raspored koordinatnih osa. Priključni kabl treba pažljivo povezati da ne ometa rad i da ne dođe do njegovog oštećenja tokom merenja, jer radnik često ne može da pazi na to dok upravlja mašinom. Srećom, nivo vibracija u ovakvim situacijama je obično stabilan, pa su i kratkotrajna merenja reprezentativna.

2.4.2. Osnovni metod ispitivanja

Osnovni metod koristi ponderisanu efektivnu (RMS) vrednost ubrzanja, definisanu sledećom formulom [7]:

$$a_W = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{T}} \cdot \int_0^{\mathrm{T}} a_W^2\,(t)dt} \qquad (2.1)$$

Navedeni izrazi znače sledeće:

- **ponderacija** označava tretman težinskom funkcijom tj. da je snimljeni signal ubrzanja u vremenu *a(t)* tretiran (filtriran) težinskom funkcijom (pogl. odeljak 2.2) i tako je dobijen signal $a_W(t)$.
- **efektivna (RMS) vrednost** omogućava dobijanje signala proporcionalnog energiji, kako bi se ocenila energija predata

ljudskom telu. Računa se kao koren (engl. „root“) usrednjenih (engl. „mean“) kvadrata (engl. „square“) i odatle termin „RMS“ (engl. „root mean square“).

Merenje se vrši simultano u sve tri ose, pri čemu se različite težinske funkcije koriste za z-osu i za x i y ose. Na taj način se dobijaju a_{Wx}, a_{Wy} i a_{Wz}. Za referentni period se uzima osmočasovno radno vreme T = 8 h [7, 11], pa ako je trajanje izlaganja u toku radnog vremena T_{exp}, ukupno izlaganje po osama je:

$$A_x(8) = 1{,}4 \cdot a_{Wx} \cdot \sqrt{\frac{\mathrm{T_{exp}}}{8\ \mathrm{h}}} \tag{2.2.1}$$

$$A_y(8) = 1{,}4 \cdot a_{Wy} \cdot \sqrt{\frac{\mathrm{T_{exp}}}{8\ \mathrm{h}}} \tag{2.2.2}$$

$$A_z(8) = a_{Wz} \cdot \sqrt{\frac{\mathrm{T_{exp}}}{8\ \mathrm{h}}} \tag{2.2.3}$$

Treba obratiti pažnju da ISO 2631-1 propisuje dodatni faktor k = 1,4 za x i y ose, a taj faktor je k = 1 za z-osu. Konačno, vrednost koja se poredi sa graničnim i akcionim vrednostima definisanim pravilnikom [11] je A(8) za koju se usvaja *najveća od tri dobijene vrednosti po osama*.

U slučaju kada se rad sastoji iz više intervala izlaganja t_1, t_2, … , t_n različitim nivoima vibracija $a_{Wx,1}$, $a_{Wx,2}$, … , $a_{Wx,n}$, koristi se sledeća formula (primer je dat samo za x-osu):

$$A_x(8) = 1{,}4 \cdot \sqrt{\frac{a_{Wx,1}^2 t_1 + a_{Wx,2}^2 t_2 + \cdots + a_{Wx,n}^2 t_n}{8\ h}} \tag{2.3}$$

2.4.3. Dopunski metodi ispitivanja

Ukoliko se signal vibracija ne menja značajno u toku merenja, osnovni metod ispitivanja je dovoljan. U slučaju da postoje udari ili druge snažne tranzijentne vibracije, pored osnovnog, ISO 2631-1 preporučuje dodatne metode. One se savetuju kada je krest-faktor (CF) veći od 9, pri čemu je CF definisan kao moduo odnosa najveće trenutne vršne vrednosti signala $a_W(t)$ i njegove efektivne (RMS) vrednosti. Kako instrument uzorkuje vrednosti $a_W(t)$ tokom trajanja merenja, može zapamtiti najveću izmerenu vrednost. Ta vrednost se podeli sa izračunatim a_W prema formuli 2.1 i apsolutna vrednost ovog odnosa predstavlja krest-faktor (CF).

Prva dodatna veličina koja se može izračunati je **maksimalna tranzijentna vrednost vibracija (MTVV)** koja se nalazi na sledeći način. Najpre se primeni sledeća formula:

$$a_W(t_0) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \cdot \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_W^2(t)dt} \tag{2.4}$$

gde je τ = 1 s. Ova formula predstavlja „prozor“ od 1 sekund, kojim se određuje $a_W(t_0)$ za svaki trenutak t_0 u toku merenja. Ukoliko merenje traje 20 minuta, u npr. 15-tom sekundu (t_0 = 15 s) odredi se a_W(15 s):

$$a_W(t_0 = 15\ \text{s}) = \sqrt{\frac{1}{1\ \text{s}} \cdot \int_{14\ s}^{15\ s} a_W^2(t)dt}$$

Na taj način se dobija tranzijentna vrednost vibracija između 14-tog i 15-tog sekunda. Isto se uradi za sve vremenske podintervale od 1 s u toku čitavog trajanja merenja i najveća dobijena vrednost predstavlja MTVV.

Druga dodatna veličina je **vibraciona dozna vrednost (VDV)**, kumulativna veličina koja raste sa trajanjem merenja i naglašava prisutne udare i tranzijente tako što vrednost vibracija podiže na četvrti stepen:

$$VDV = \left(\int_0^{\mathrm{T}} a_W^4 \, (t) dt \right)^{\frac{1}{4}} \tag{2.5}$$

Ukoliko je trajanje merenja T_{meas} kraće od trajanja ekspozicije T_{exp}, potrebno je izračunati vrednosti VDV za ceo period ekspozicije [12]:

$$VDV_{exp,x} = VDV_x \cdot 1{,}4 \cdot \left(\frac{\mathrm{T_{exp}}}{\mathrm{T_{meas}}} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{2.6.1}$$

$$VDV_{exp,y} = VDV_y \cdot 1{,}4 \cdot \left(\frac{\mathrm{T_{exp}}}{\mathrm{T_{meas}}} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{2.6.2}$$

$$VDV_{exp,z} = VDV_z \cdot \left(\frac{\mathrm{T_{exp}}}{\mathrm{T_{meas}}} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{2.6.3}$$

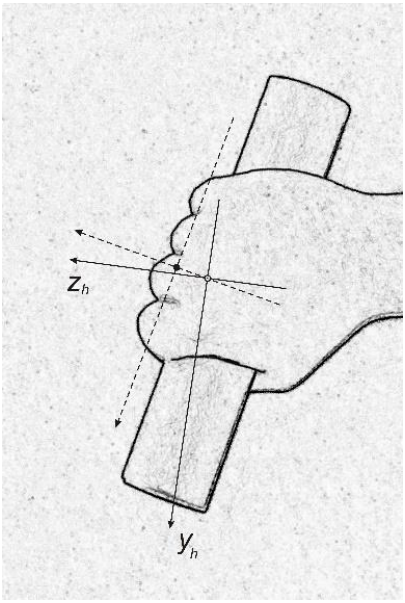
U slučajevima kada se ukupno izlaganje sastoji iz više perioda izlaganja različitim magnitudama u različitom trajanju, VDV se izračunava primenom formule [7]:

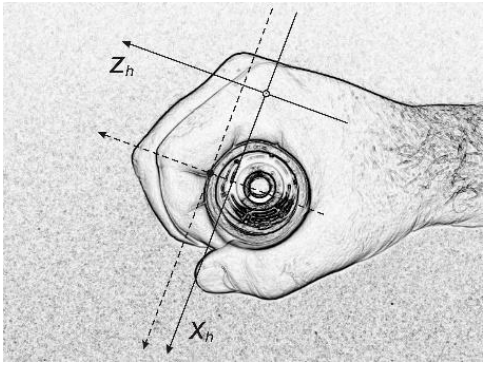
$$VDV_{total} = \left(\sum_i VDV_i^4 \right)^{\frac{1}{4}} \tag{2.7}$$

Ova vrednost se zasebno izračunava za svaku od tri ose i najveća od tri dobijene vrednosti se usvaja kao konačni rezultat.

2.5. Vibracije koje deluju na šaku i ruku

Ponekada nazvane „lokalne vibracije“, prema domaćim propisima [11], HAV se ispituju u skladu sa standardima ISO 5349-1 [13] i ISO 5349-2 [14]. Koordinatni sistemi koji se definišu su *bazicentrični* i *biodinamički* (Slika 2.9). Bazicentrični se vezuje za izvor vibracija (npr. ručku pomoću koje operater upravlja vibrirajućim alatom), dok se biodinamički vezuje za šaku/ruku operatera. U praktičnim ispitivanjima se uglavnom koristi bazicentrični sistem, pošto se akcelerometar pričvršćuje tako da pokazivanja po osama odgovaraju njegovim x, y i z osama.





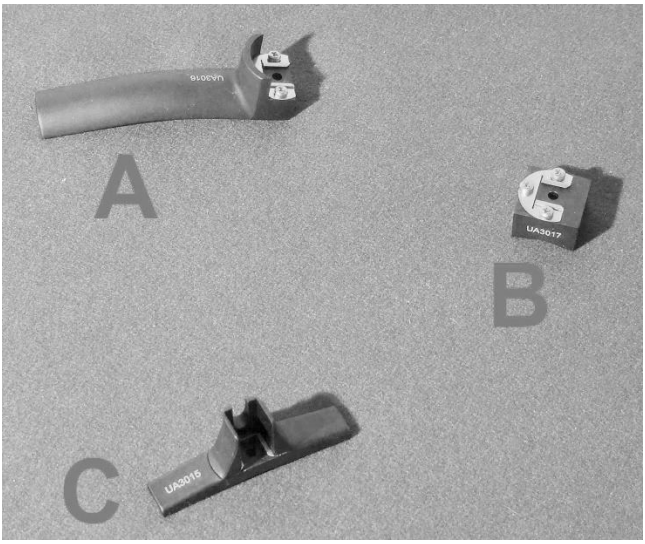
Slika 2.9. Bazicentrični (isprekidana linija) i biodinamički (puna linija) koordinatni sistem.

2.5.1. Montaža i povezivanje senzora

Najvažnija pitanja u postupku ispitivanja humanih vibracija u praksi su pravilna montaža i povezivanja akcelerometra [8]. ISO standard 5349-2 [14] se detaljno bavi praktičnom implementacijom postupka merenja prema ISO 5349-1 [13] i sadrži dosta informacija na ovu temu. Međutim, broj mogućih

situacija u praksi prevazilazi uobičajene koje su u tom tekstu opisane, tako da je potrebno dosta vežbe i iskustva da bi ispitivač savladao ovu veštinu.

Radi lakšeg korišćenja merne opreme, proizvođači uobičajeno obezbeđuju adaptere za montažu akcelerometra u najčešćim situacijama. Tri tipa, koji se koje se isporučuju uz B&K tip 4447, prikazani su na Slici 2.10.



Slika 2.10. Adapteri za montažu troosnog akcelerometra za merenje vibracija koje se prenose preko ruke i šake: adapter za (A) ručku preko dlana; (B) montažu preko vezice za kablove; (C) ručku koji se oslanja na prste.

Pored primene adaptera prilagođenih za ručke vibrirajućih alata i kompleta za montažu pomoću vezica za kablove, akcelerometri se mogu lepiti na vibrirajuću površinu pomoću pčelinjeg voska, lepka, specijalnih snažnih magneta ili na druge načine. Najbolji frekvencijski odgovor postiže se lepljenjem adaptera cijanoakrilatnim lepkom, ali to otežava njegovo naknadno uklanjanje. Nešto lošije rešenje, u smislu frekvencijskog odziva, je pčelinji vosak. On se lakše nanosi i uklanja, ali se ne može koristiti pri većim temperaturama vibrirajuće površine. U oba slučaja je potrebno dobro očistiti i pripremiti površinu za lepljenje i koristiti što tanji sloj lepka ili voska.

Sam akcelerometar se, na adapter, najčešće pričvršćuje pomoću specijalnog šrafa. Prilikom montaže, od suštinskog značaja je da se obezbede:

- čvrsta, odnosno kruta sprega akcelerometra i vibrirajuće površine, i
- postavljanje akcelerometra što bliže tački ulaska energije vibracija u šaku/ruku operatera.

Ova dva uslova u praksi nije lako ostvariti. Svaki način vezivanja ima svoje mane, pa tako pčelinji vosak često nije pogodan za lepljenje na neravnu ili nečistu površinu motorne alatke, magnet prianja samo na gvozdene površine dok su mnogi ručni vibrirajući alati u plastičnom kućištu, a adapter koji drži ispitanik ometa normalno držanje ručke i on ga ponekada ne drži dovoljno čvrsto. Pojedini adapteri imaju izbočine na kojima se akcelerometar montira, pa ti delovi, u toku rada, mogu oscilovati sa značajno većim amplitudama od onih koje su reprezentativne za tačku ulaska vibracione energije u šaku.

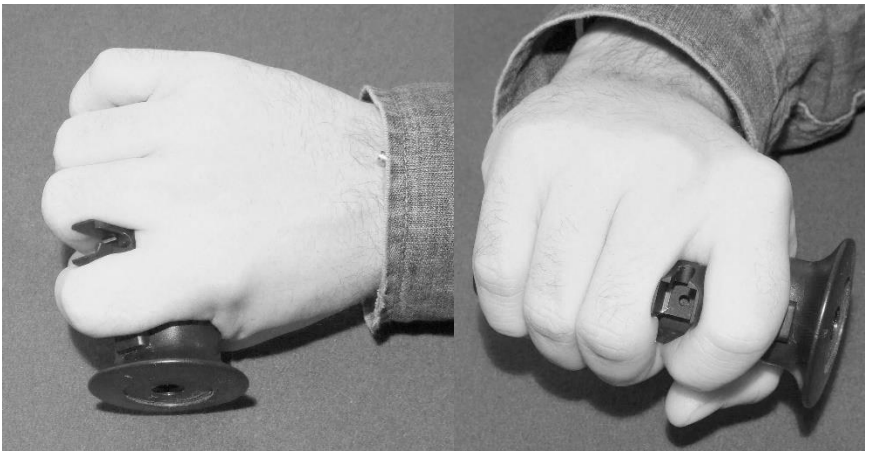
Način upotrebe adaptera za ručku preko dlana, prikazan je na Slikama 2.11 i 2.12.

Slika 2.11. Adapter za ručku preko dlana.

Namenski troosni akcelerometar se montira umetanjem u ležište, vidljivo na Slici 2.11 i fiksiranjem pomoću šrafova. Način držanja alata preko ovakvog adaptera prikazan je na Slici 2.12.

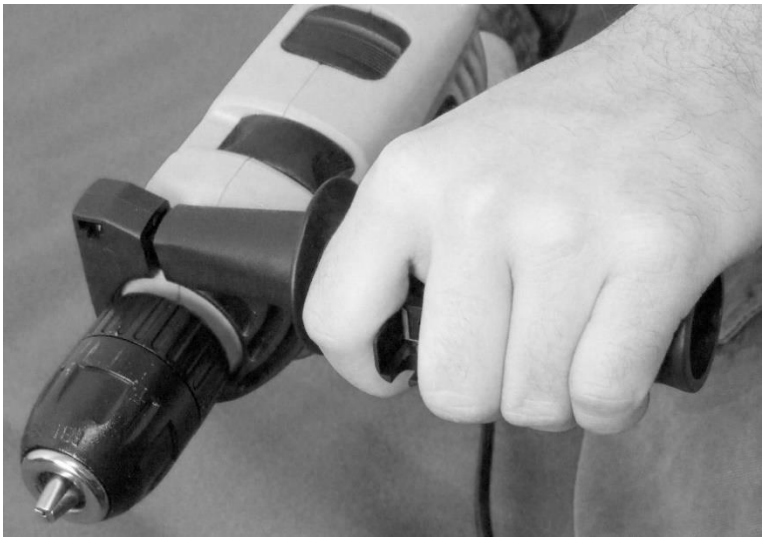
Slika 2.12. Primena adaptera za ručku preko dlana.

Kod primene ovog adaptera, treba obratiti pažnju da ne dođe do klizanja i pomeranja u toku merenja, kao i da ispitanik čvrsto drži ručku alata i adapter. Drugačiji adapter, koji se oslanja na prste, prikazan je na Slici 2.13.



Slika 2.13. Adapter za ručku, koji se oslanja na prste.

Način držanja alata preko ovakvog adaptera prikazan je na Slici 2.14.



Slika 2.14. Primena adaptera za ručku, koji se oslanja na prste.

Kod primene ovakvih adaptera, može doći do oscilovanja akcelerometra sa većim amplitudama od onih koje su reprezentativne za tačku ulaska vibracione energije u šaku, naročito ako mehanička sprega nije dovoljno kruta.

U praksi su poznati i drugi metodi montaže, koje proizvođači opreme nisu predvideli, pa i postupci koji su delimično destruktivni. Na primer, rigidna montaža se može obaviti pomoću cijanoakrilatnog lepka, ali se akcelerometar posle mora odvojiti od vibrirajuće površine. Ako bi se akcelerometar direktno lepio na vibrirajuću površinu, bio bi oštećen prilikom skidanja. Zato se, na vibrirajuću površinu, lepi adapter od aluminijuma sa navojem za šraf za montažu akcelerometra. Adapter se privremeno lepi na površinu mašine, a akcelerometar se ušrafi na njega. Po obavljenom merenju, akcelerometar se odšrafi i ukloni, a adapter se pažljivo odvoji čekićem ili primenom hemijskog sredstva. Moguće je urezati navoj za montažu akcelerometra direktno u površinu mašine, koristiti stezače za creva i sl.

Priključni kabl se sprovodi tako da ne ometa previše ispitanika u radu, da ne predstavlja opasnost po bezbedan rad, da se ne ošteti prilikom merenja i ne utiče na rezultat putem triboelektričnog efekta [8]. Ovo takođe u praksi nije lako postići i zahteva iskusnog ispitivača. Uglavnom se koristi lepljiva traka da se kabl privremeno fiksira u blizini tačke montaže akcelerometra, sprovede duž ruke operatera i sl. U novije vreme, pojavila su se i rešenja za bežično povezivanje akcelerometra sa instrumentom.

Postoje situacije gde nema univerzalnog rešenja, kako za postavljanje kabla, tako ni za montažu samog akcelerometra. Takav primer su ispitivanja vibracija koje se prenose preko predmeta obrade (npr. rad na stacionarnoj testeri sa cirkularnim sečivom). U ovakvoj situaciji, konkretno, uobičajena praksa je da se simulira ekspozicija preko obrade komada otpadnog materijala na koji se, na pogodan način, fiksira akcelerometar.

2.5.2. Metod ispitivanja

Snimljeni signal ubrzanja u vremenu *a(t)* ponderiše se težinskom funkcijom H(s) koja je definisana u Aneksu A standarda ISO 5349-1 i tako se dobija signal $a_W(t)$ [13]. Težinska funkcija za šaku-ruku je ista za svaku od tri ose u kojima se vibracije snimaju. Prema standardu, snimaju se sve tri komponente a_{hWx}, a_{hWy}, a_{hWz} i onda se one kombinuju u tzv. **Totalnu vrednost vibracija** a_{hv}:

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hWx}^2 + a_{hWy}^2 + a_{hWz}^2} \tag{2.8}$$

Trajanje pojedinačnog merenja a_{hW} treba da bude reprezentativno za izlaganje ispitanika vibracijama i, prema standardu, treba da traje najmanje 60 s [14]. Pošto se, u praksi, često javljaju radne operacije kod kojih su izlaganja kratka, ukupno trajanje merenja *T* ponderisanog ubrzanja a_{hW} se može izdeliti na *N* kraćih intervala t_j (j = 1, 2, … , *N*) tokom kojih se obavlja merenje a_{hWj}, pa se a_{hW} nalazi primenom formule:

$$a_{hW} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \sum_{j=1}^{N} a_{hWj}^2 \cdot t_j} \tag{2.9}$$

Pri tome, intervali pojedinačnih merenja t_j treba da budu najmanje 8 s [14]. U slučaju primene troosnog akcelerometra sa simultanim uzorkovanjem u sve tri ose, što predstavlja najbolje rešenje, na raspolaganju će biti a_{hvj} već izračunat prema formuli 2.8 za svaki od intervala t_j, i tada se a_{hv} za ispitivanu radnu operaciju može izračunati iz:

$$a_{hv} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \sum_{j=1}^{N} a_{hvj}^2 \cdot t_j} \tag{2.10}$$

Merenje a_{hv} vrši se za svaku radnu operaciju i treba se ponoviti više puta, da bi se mogle odrediti srednja vrednost i merna nesigurnost (pogl. odeljak 5.6.2.1). Ovi rezultati se koriste za izračunavanje dnevne izloženosti normirane na osmočasovni referentni period A(8) prema važećem pravilniku i porede se sa dnevnom akcionom i dnevnom graničnom vrednošću izlaganja [11].

Ako je samo jedna radna operacija značajno doprinela izlaganju vibracijama, ona se normira na osmočasovno radno vreme primenom formule [12]:

$$A(8) = a_{hv} \cdot \sqrt{\frac{\mathrm{T_{exp}}}{8\ \mathrm{h}}} \tag{2.11}$$

gde je $\mathrm{T_{exp}}$ trajanje izlaganja nivou vibracija a_{hv}. Ukoliko, međutim, u toku osmočasovnog radnog vremena postoji više radnih operacija i = 1, 2, … , n, čija su trajanja t_i i imaju različite totalne vrednosti vibracija a_{hvi}, tada se A(8) određuje sledećom formulom [14]:

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{8\ h} \cdot \sum_{i=1}^{n} a_{hvi}^2 \cdot t_i} \tag{2.12}$$

Primer. U radionici se izlaganje vibracijama javlja kod tri glavne radne operacije: bušenje, sečenje i ravnanje. Bušenje traje približno $t_{buš}$ = 120 min dnevno, sečenje $t_{seč}$ = 180 min i ravnanje t_{rav} = 90 min. Merenje se započinje ispitivanjem radne operacije "Bušenje" tako što se izabere 4 reprezentativna intervala u trajanju od 20 s, 30 s, 15 s i 15 s u toku kojih se mere i beleže a_{hWx}, a_{hWy} i a_{hWz} i unose u Tabelu 2.1. Pojedini instrumenti odmah daju rezultat a_{hv} (poslednja kolona u tabeli) koji se dobija primenom formule 2.8. Ovi intervali pojedinačno traju duže od 8 s, a u zbiru duže od 60 s, čime su zadovoljeni zahtevi standarda. Ekvivalentna vrednost vibracija a_{hWx} = 2,50 m/s^2 dobija se primenom formule 2.9 na podatke u odgovarajućoj koloni, uz $T = \Sigma t_j$ = 80 s. Konačno, a_{hv} se može dobiti bilo primenom formule 2.10 na

podatke u odgovarajućoj koloni, ili primenom formule 2.8 na podatke u odgovarajućem redu "Total".

Tabela 2.1. Rezultati prvog merenja a_{hv} za radnu operaciju „Bušenje".

j	t_j [s]	a_{hWx} [m/s^2]	a_{hWy} [m/s^2]	a_{hWz} [m/s^2]	a_{hv} [m/s^2]
1	20	2,12	3,01	2,66	4,54
2	30	2,82	2,95	2,91	5,01
3	15	2,13	2,56	2,73	4,31
4	15	2,64	2,88	3,21	5,06
TOTAL	80	2,50	2,88	2,88	4,78

Na ovaj način se dolazi do prve izračunate vrednosti a_{hv} = 4,78 m/s^2 iz Tabele 2.2, odnosno Tabele 5.2 iz odeljka 5.6.2.1 o mernoj nesigurnosti. Iako je proračun u tom odeljku detaljno urađen, sa procenom merne nesigurnosti, radi preglednosti će isti proračun biti urađen i ovde, sa fokusom na određivanje A(8).

Na isti način kako je urađeno jedno merenje i proračun a_{hv}, to se ponavlja još četiri puta, kako bi se dobila tačnija ocena izlaganja i izračunala merna nesigurnost. Dobijaju se sledeći rezultati:

Tabela 2.2. Rezultati ponovljenih merenja a_{hv} za radnu operaciju „Bušenje".

Broj merenja	1	2	3	4	5
$\boldsymbol{a_{hv}}$ **[m/s^2]**	4,78	3,94	5,32	5,12	4,28

Iz ovih podataka, srednja vrednost $a_{hv,buš}$ za radnu operaciju „bušenje" nalazi se kao aritmetička sredina:

$$a_{hv,buš} = \frac{4{,}78 + 3{,}94 + 5{,}32 + 5{,}12 + 4{,}28}{5} = 4{,}688\ {}^{m}/_{s^2} \approx 4{,}69\,{}^{m}/_{s^2}$$

Na identičan način se nalaze i totalne vrednosti vibracija za radne operacije „sečenje" i „ravnanje". Za potrebe ovog primera, to su $a_{hv,seč}$ = 1,61 m/s^2 i

$a_{hv,rav}$ = 2,13 m/s^2 respektivno. Na kraju se A(8) određuje primenom formule 2.12:

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{8 \cdot 60} \cdot \left(a_{hv,buš}^2 t_{buš} + a_{hv,seč}^2 t_{seč} + a_{hv,rav}^2 t_{rav}\right)} = 2{,}706 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$
$$\approx 2{,}71 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

Dobijena vrednost se poredi sa akcionim i graničnim vrednostima definisanim pravilnikom [11].

Navedeni primer predstavlja jedan od složenijim mernih scenarija. U standardu ISO 5349-2 opisani su i primeri jednostavnijih mernih scenarija, a date su i smernice o načinima izbora reprezentativnog mernog intervala.

3. Toplotno opterećenje i termalni komfor

3.1. Uvod

Toplotno opterećenje je ozbiljna opasnost na radu jer može dovesti i do fatalnog ishoda. Preopterećenje nastaje kada je sposobnost tela da reguliše svoju temperaturu ugrožena viškom toplote koja delom potiče iz okoline, a delom se oslobađa u biohemijskim procesima u samom organizmu (tzv. metabolička toplota). Može dovesti do osipa, grčeva, iscrpljenosti i toplotnog udara. Glavni faktori koji utiču na pojavu toplotnog opterećenja su:

- **Faktori radne okoline** – Prisustvo veštačkih izvora toplote u zatvorenim prostorima kao što su pekare, livnice, fabrike, kuhinje i vešeraji ili od Sunca na otvorenom u građevinarstvu, na putevima ili u poljoprivredi. U zatvorenom prostoru, pored prisustva izvora toplote, dodatni faktor opterećenja je i slaba ventilacija koja dovodi do povećane vlažnosti. Na otvorenom treba uzeti u obzir promene vremenskih prilika i sezonske promene.
- **Metabolička toplota** – Toplota koja se oslobađa metabolizmom u telu, a koja se značajno uvećava intenziviranjem fizičke aktivnosti. Zavisi od težine fizičkog posla, pa se može javiti veće toplotno opterećenje i u odsustvu spoljnih izvora, npr. u rudnicima, naročito u uslovima veće vlažnosti.
- **Odeća** – Hidroizolacione osobine odeće utiču na sposobnost oslobađanja viška toplote putem isparavanja znoja. Toplotno-izolacione osobine utiču na neposredan transfer toplote kondukcijom i konvekcijom. Emisione i refleksione osobine odeće utiču na upijanje toplotnog zračenja iz spoljašnje sredine. Toplota se oslobađa i disanjem, pa određene vrste odeće, koje ometaju disanje, takođe mogu imati uticaj.

Telo razmenjuje toplotu kroz četiri glavna mehanizma:

- **Kondukcija** – predstavlja direktan prenos toplote sa toplijeg na hladnije telo pri dodiru ta dva tela. Nastaje npr. prilikom držanja hladnog ili toplog metalnog rukohvata. Uglavnom ima značaj zbog lokalnih efekata.
- **Konvekcija** – Nastaje prilikom prenosa toplote na vazduh koji okružuje kožu. Zagrejani vazduh se diže u vis i tako udaljava od tela, a zamenjuje ga hladniji vazduh koji se dalje zagreva.
- **Zračenje** – Prenos toplote preko elektromagnetnih, uglavnom infracrvenih zraka. Razmena toplote ovim mehanizmom postoji kada se temperatura tela i predmeta u njegovoj okolini razlikuju. Ovaj mehanizam je naročito značajan kada su prisutni veći izvori toplote, npr. Sunce pri radu na otvorenom. Telo gubi približno 60 % toplote ovim mehanizmom [15].
- **Isparavanje** – Pri znojenju i disanju, određena količina vode isparava i napušta telo. To isparavanje troši značajnu toplotnu energiju (tzv. *latentna toplota isparavanja*, za vodu na 37 °C je 2413 kJ/kg) [16]. Ovaj mehanizam postaje primaran prilikom većeg fizičkog opterećenja, dok u mirovanju, telo njime gubi oko 20 % toplote [15]. Efikasnost ovog mehanizma dosta zavisi od relativne vlažnosti okolnog vazduha i izolacionih osobina odeće.

Radi karakterizacije faktora okoline, potrebno je kvantitativno odrediti sledeće veličine:

- **Temperatura vazduha T_a** – određuje se termometrom zaštićenim od zračenja, pri čemu vazduh slobodno struji oko senzora.
- **Brzina strujanja vazduha v_a** – određuje se anemometrom. Po potrebi, zavisno od metoda ispitivanja, unose se korekcije zbog kretanja ljudskog tela i konvekcije.
- **Relativna vlažnost vazduha *RH*** – određuje se higrometrom i predstavlja meru količine vodene pare u vazduhu u odnosu na količinu koja bi bila prisutna da je vazduh zasićen, izraženu u procentima. Preciznije, to je odnos parcijalnog pritiska vodene pare u vazduhu p_a i pritiska vodene pare u uslovima zasićenja p_{sat} na posmatranoj temperaturi (formula 3.1). Pritisak zasićenja raste sa

temperaturom, pa topliji vazduh može sadržati više vlage nego hladniji.

- **Toplotno zračenje** – Elektromagnetno zračenje koje emituju sva tela na temperaturi većoj od apsolutne nule. U okolini sobne temperature, najveći deo ovog zračenja je u infracrvenoj oblasti. Za potrebe ispitivanja toplotnog opterećenja ljudi, obično se izražava preko *srednje radijantne temperature* $\boldsymbol{T_r}$. Ona se definiše kao uniformna temperatura zidova zamišljene prostorije u kojoj je razmena toplote ljudskog tela putem zračenja ista kao razmena toplote zračenjem u stvarnoj prostoriji koja se ispituje [17]. Određuje se radiometrom, ili posredno, npr. preko temperature globus-termometra [17].

$$RH = \frac{p_a}{p_{sat}} \cdot 100\ [\%] \tag{3.1}$$

Toplotno opterećenje stvara neprijatan osećaj koji negativno utiče na produktivnost pri radu. Zato se, pored metoda ispitivanja mogućnosti nastanka preopterećenja neposredno opasnog po život i zdravlje, izdvajaju metode kojima se ispituje termalni komfor.

3.2. Metode ispitivanja toplotnog opterećenja

Toplotno opterećenje najbolje se može pratiti metodama personalnog monitoringa. Najtačnije među njima su one koje uključuju praćenje relevantnih fizioloških parametara (duboka telesna temperatura, rad srca) tokom celog trajanja radnog vremena. Savremeni pristup personalnom monitoringu uključuje gutanje specijalnih kapsula sa senzorima temperature, koji izmerene vrednosti radio-vezom prosleđuju sistemu za očitavanje spolja. Stariji pristup uključuje manje pogodne metode, poput merenja rektalne temperature, koja je dobro korelisana sa dubokom telesnom temperaturom (stabilnom temperaturom unutrašnjih organa). Neinvazivne metode personalnog monitoringa mogu biti kontinuirana očitavanja fizioloških parametara spolja, putem uređaja koji se nose na grudima ili kao narukvice, ili povremeni prekidi rada kako bi se izmerili fiziološki parametri: brzina srčanog rada, spoljna telesna temperatura.

Spoljna telesna temperatura, međutim, slabije korelira sa dubokom telesnom temperaturom, koja je najbolji pokazatelj toplotnog opterećenja: sa promenama uslova okoline, menja se i temperatura površine tela, dok duboka telesna temperatura ostaje relativno stabilna [18].

Iz praktičnih i razloga ekonomičnosti, uglavnom se pribegava ambijentalnom monitoringu: mere se parametri radne okoline, pa se na osnovu njih izračunava neki od indeksa toplotnog opterećenja, ili se oni koriste za računarske simulacije. U ove svrhe su razvijeni brojni indeksi: CET (engl. corrected effective temperature, korigovana efektivna temperatura), HSI (engl. heat stress index, indeks toplotnog naprezanja), P4SR (engl. predicted 4-hour sweat rate, predviđena četvoročasovna brzina znojenja) i sl. Među najšire prihvaćenima je WBGT indeks (engl. wet bulb globe temperature, temperatura vlažnog kuglastog termometra) [19] koji će biti opisan u nastavku.

3.3. WBGT indeks

Ispitivanje toplotnog opterećenja putem WBGT indeksa je standardizovano u ISO 7243 [20]. Ovaj indeks opisuje združeni efekat faktora okoline: temperature, brzine strujanja i vlažnosti vazduha, kao i infracrvenog zračenja. Nalazi se istovremenim merenjem:

- **temperature suvog termometra T_a** termometrom zaštićenim od zračenja,
- **temperature prirodnog vlažnog termometra T_{nw}** čiji je senzor prekriven vlažnim fitiljem oko kojeg vazduh slobodno struji, i
- **temperature globus-termometra T_g** kod kojeg se senzor nalazi u centru tankog metalnog globusa, obojenog mat crnom bojom, emisivnosti $\varepsilon = 0{,}95$.

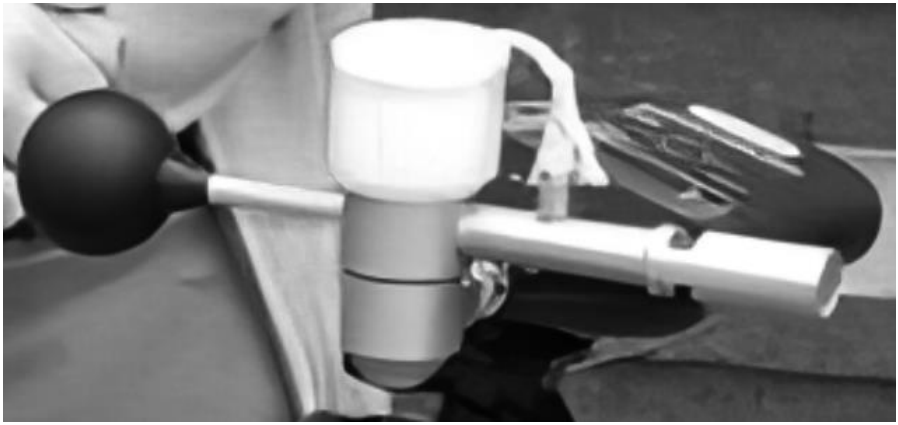
Merenje se, po ISO 7243, sprovodi u toku reprezentativnog perioda od 1 časa, koji započinje nakon isteka vremena stabilizacije senzora (obično 20 do 30 minuta). Rezultati se, zatim, kombinuju u WBGT indeks za slučajeve

bez solarnog opterećenja (formula 3.2) ili sa solarnim opterećenjem, tj. pri izlaganju direktnom toplotnom zračenju Sunca (formula 3.3) [20].

$$WBGT_{nsl} = 0{,}7T_{nw} + 0{,}3T_g \tag{3.2}$$

$$WBGT_{sl} = 0{,}7T_{nw} + 0{,}2T_g + 0{,}1T_a \tag{3.3}$$

Merenja se obično sprovode specijalizovanim instrumentima koji na sebi imaju senzore T_a, T_{nw} i T_g. Jedan takav instrument prikazan je na Slici 3.1. Sa leve strane je globus-termometar, sa desne suvi termometar sa zaštitom od zračenja, a u sredini je prirodni vlažni termometar čija se vlažnost održava destilovanom vodom koja se iz rezervoara dovodi pamučnim fitiljem.



Slika 3.1. Instrument za merenje WBGT model Microtherm Heat Stress WBGT proizvođača Casella.

ISO 7243 sadrži referentne vrednosti WBGT indeksa, date u zavisnosti od metaboličke brzine (brzine oslobađanja toplote u telu metabolizmom) za standardnu pamučnu radnu odeću [20]. U standardu je navedeno pet klasa metaboličke brzine, za različite nivoe fizičkog naprezanja, uz tipične vrste radnih aktivnosti koje su sa njima povezane. Data je i korekcija koja se unosi ukoliko se odeća značajno razlikuje od standardne pamučne radne odeće.

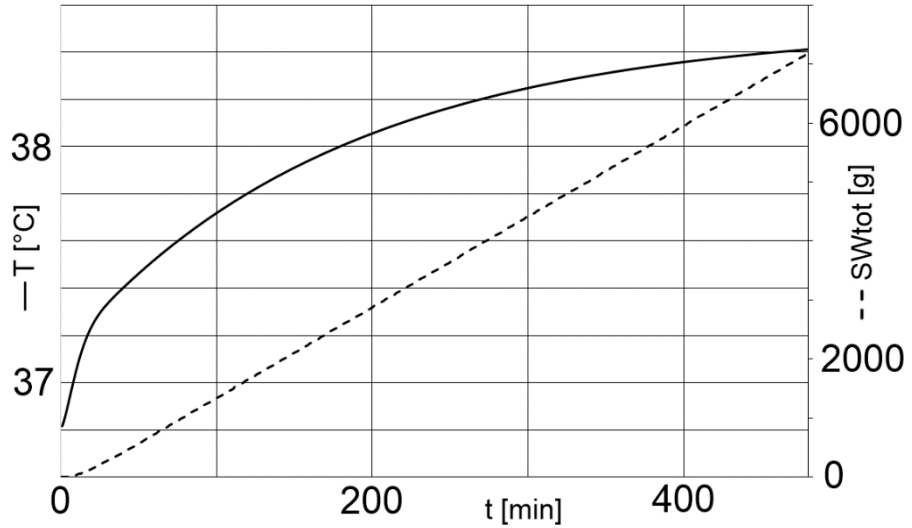
Ukoliko je izmerena vrednost veća od referentne, standard preporučuje da se ili odmah sprovedu mere za smanjenje toplotnog opterećenja, ili da se uradi detaljnija analiza toplotnog opterećenja prema ISO 7933.

3.4. Predviđeno toplotno naprezanje

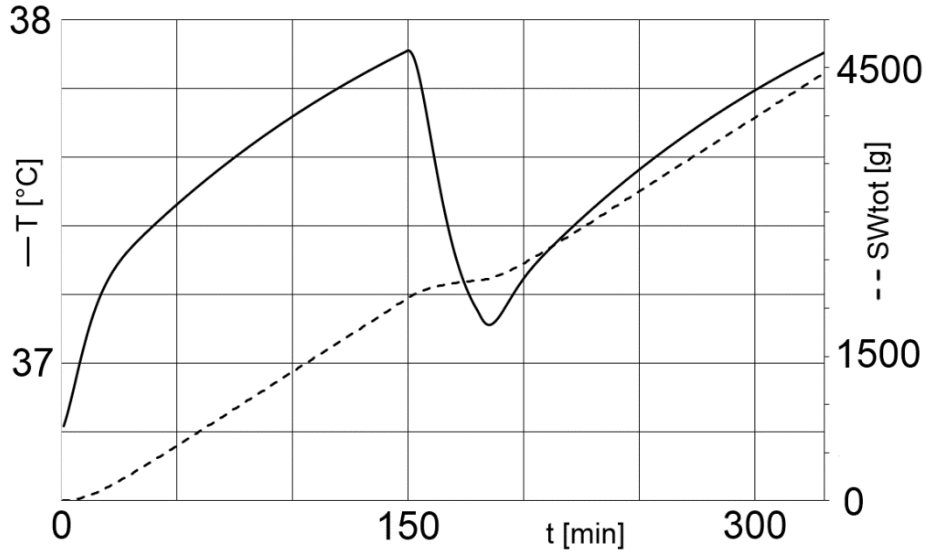
ISO 7933, pomenut u prethodnom odeljku, bavi se analitičkim određivanjem toplotnog opterećenja izračunavanjem predviđenog toplotnog naprezanja (engl. predicted heat strain, PHS) [21]. Zasnovan je na složenom matematičkom modelu izgrađenom oko jednačine termalnog balansa, koja se algoritamski rešava korak po korak u vremenu, po pravilu primenom računara. Omogućava identifikaciju situacija gde se javlja prekomerno povećanje duboke telesne temperature ili prekomerna dehidracija normalne osobe, kao i određivanje vremena izlaganja koje je fiziološki podnošljivo (ne očekuje se narušavanje zdravlja). Na osnovu maksimalno dozvoljenog pojedinačnog vremena izlaganja, moguće je planirati režim rada i odmora u datim uslovima.

Maksimalno dozvoljeno vreme izlaganja je vezano za prekoračenje referentne rektalne temperature ili kada ukupni gubitak vode znojenjem prekorači maksimalnu preporučenu vrednost. Maksimalni dozvoljeni gubitak vode je 7,5 % telesne mase za prosečnu osobu, odnosno 5 % telesne mase za zaštitu 95 % radnika, pod uslovom da mogu slobodno uzimati vodu. Ukoliko ne mogu slobodno uzimati vodu, ukupni gubitak vode je ograničen na 3 % telesne mase [21]. Maksimalna dozvoljena rektalna temperatura je 38 °C.

Primer 1. Aklimatizovani radnik, visine 1,8 m i težine 75 kg, nosi uobičajenu letnju odeću (0,5 clo prema ISO 9920 [22]) i u stojećem položaju obavlja srednje težak fizički posao (metabolička brzina M = 150 W/m^2) pri sledećim uslovima: T_a = 35 °C, T_r = 40 °C, p_a = 3 kPa, v_a = 0,1 m/s. Rezultat računarske simulacije prikazan je na Slici 3.2.



Slika 3.2. Rektalna temperatura *T* i gubitak vode *SWtot* (uslovi opisani u tekstu).



Slika 3.3. Rektalna temperatura *T* i gubitak vode *SWtot* nakon uvođenja perioda hlađenja (uslovi opisani u tekstu).

Ovde je T_a temperatura vazduha dobijena suvim termometrom, T_r je srednja radijantna temperatura, p_a je parcijalni pritisak vodene pare, a v_a je brzina strujanja vazduha. Punom linijom prikazana je rektalna temperatura, a isprekidanom ukupni gubitak vode u gramima. Nalazimo da dolazi do prekoračenja dozvoljene rektalne temperature od 38 °C nakon 180 minuta.

U cilju zaštite od toplotnog preopterećenja, nakon 150 minuta provedenih u navedenim uslovima, uvodi se 30 minuta pauze (sedeći položaj, M = 80 W/m^2) u prostoriji za odmor, pri sledećim uslovima: T_a = 22 °C, T_r = 25 °C, p_a = 1,2 kPa, v_a = 0,3 m/s. Vidimo da u toku 330 minuta više ne dolazi do prekoračenja dozvoljene rektalne temperature (Slika 3.3). Međutim, dozvoljeni ukupni gubitak vode od 5 % (kriterijum zaštite 95 % radnika) za osobu od 75 kg je 0,05·75·1000 g = 3750 g, što je prekoračeno posle 285 min. Prosečna osoba od 75 kg, uz slobodan unos vode, prema ISO 7933 može da izdrži gubitak vode od 7,5 % odnosno 0,075·75·1000 = 5625 g.

Kod primene PHS modela, **važno je imati u vidu opsege ulaznih parametara za koje je standard ispitan i primenljiv**. Ovi opsezi navedeni su u ISO 7933, aneks A [21].

3.4.1. Parcijalni pritisak vodene pare

Među ulaznim podacima u prethodnom primeru, pojavljuje se parcijalni pritisak vodene pare u vazduhu p_a. On je u vezi sa izmerljivim veličinama: temperaturom T i relativnom vlažnošću vazduha RH. Može se računati primenom definicije i tablica iz kojih se čita pritisak zasićenja na datoj temperaturi. Ako se koristi računar, jednostavniji način je da se primeni približna model-formula zasnovana na poznatoj Tetens-ovoj formuli [23]:

$$p_a \approx 0{,}00611 \cdot RH \cdot e^{\frac{17{,}27 \cdot T}{237{,}3+T}} \tag{3.4}$$

Ovde je RH izraženo u procentima, p_a u kPa, a T u °C.

Primer 2. Pri izmerenim RH = 53,4 % i T = 35 °C (uslovi iz Primera 1) treba izračunati p_a da bi se ta vrednost upotrebila u simulaciji. Prema tablicama

[24] na 35 °C je pritisak zasićenja p_{sat} = 56,2 mbar = 5,62 kPa. Iz definicije (formula 3.1) nalazimo da je p_a = 0,534·5,62 kPa ≈ 3 kPa. Isti rezultat približno možemo dobiti i primenom formule 3.4 direktno iz izmerenih *RH* i *T* bez tablica.

3.4.2. Srednja radijantna temperatura

Među faktorima okoline koji se koriste kao ulazne veličine PHS modela, nalazi se i srednja radijantna temperatura T_r koja služi za kvantifikaciju toplotnog zračenja. U slučaju merenja pomoću globus-termometra, u prisustvu prinudnog protoka vazduha (koji ne nastaje prirodnom konvekcijom, već usled vetra ili neke druge sile), srednja radijantna temperatura izračunava se sledećom formulom [17]:

$$T_r = \left[\left(T_g + 273\right)^4 + \frac{1{,}1 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6}}{\varepsilon_{\mathrm{g}} \cdot \mathrm{D}^{0,4}} \left(T_g - T_a\right) \right]^{1/4} - 273 \qquad (3.5)$$

Ovde je T_g temperatura globus-termometra, T_a temperatura suvog termometra, v_a brzina strujanja vazduha, ε_{g} emisivnost globusa, a D je njegov prečnik.

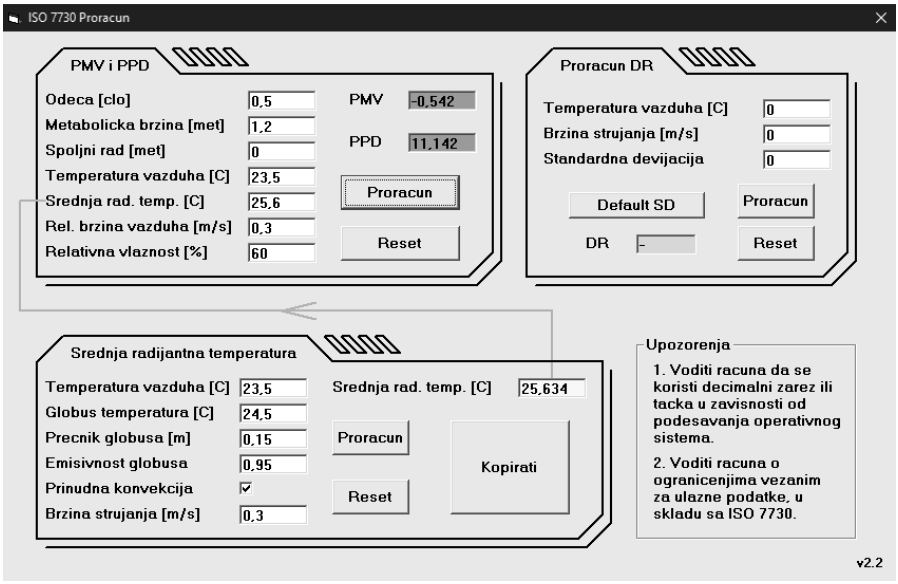
Primer 3. Pri sledećim uslovima okoline: T_a = 35 °C, T_g = 38,3 °C, v_a = 0,1 m/s, za standardni globus sa parametrima ε_{g} = 0,95 i D=0,15 m, srednja radijantna temperatura, po formuli 3.5, je 39,985 °C ≈ 40 °C što odgovara vrednostima iz Primera 1. Da bi se smanjila verovatnoća nastanka grešaka i olakšao rad, ova izračunavanja se takođe uobičajeno vrše primenom računara.

3.5. Indeksi termalnog komfora PMV i PPD

Predviđeni prosečan rezultat izjašnjavanja (engl. predicted mean vote, PMV) je indeks termalnog komfora zasnovan na modelu koji je predložio Fanger [25]. Njegova primena je standardizovana u ISO 7730 [26]. PMV predviđa prosečno izjašnjavanje velike grupe ljudi o toplotnom komforu u zavisnosti od uslova okoline. Namenjen je za umereno toplotno okruženje i konstantan nivo fizičkog naprezanja pri skoro konstantnim uslovima sredine. Pogodan je

za ergonomsku procenu rada u zatvorenim prostorijama i fizički nezahtevne poslove.

PMV koristi šest ulaznih parametara: temperaturu, relativnu vlažnost i brzinu strujanja vazduha, srednju radijantnu temperaturu, metaboličku brzinu i izolacione osobine odeće (spoljni rad se najčešće zanemaruje). Skala PMV se kreće od -3 (vrlo hladno) do +3 (vrlo toplo). Izračunava se rešavanjem četiri jednačine date u ISO 7730, od kojih se dve rešavaju iterativno, što se realizuje primenom računara (Slika 3.4). Kao i kod drugih indeksa, **mora se paziti na opseg parametara pri kojima je model validan**. Ovi opsezi su navedeni u ISO 7730.



Slika 3.4. Računarska aplikacija za izračunavanje PMV, PPD i DR.

Predviđeni procenat nezadovoljnih (engl. predicted percentage of dissatisfied, PPD) je komplementaran indeks PMV-u. Ukazuje na predviđeni procenat osoba koje bi bile nezadovoljne datim termalnim okruženjem. Izračunava se na osnovu PMV prema istom standardu, koji takođe uključuje i faktor promaje (engl. draught rate, DR). ISO 7730 definiše faktor promaje

kao procenat ljudi za koje se predviđa da će im smetati neželjeno lokalno hlađenje tela izazvano kretanjem vazduha.

3.6. Domaća regulativa

U okviru Pravilnika o preventivnim merama za bezbedan i zdrav rad na radnom mestu, postoji tabela dozvoljenih vrednosti temperature, relativne vlažnosti i brzine strujanja vazduha u radnim prostorijama, u zavisnosti od fizičke težine rada i spoljašne temperature [27]. Odstupanja su dozvoljena na radnim mestima na kojima je temperatura uslovljena tehnološkim procesom. Razmena toplote zračenjem nije uzeta u obzir. Međutim, Pravilnik o načinu i postupku procene rizika na radnom mestu i u radnoj okolini sadrži prepoznavanje i utvrđivanje opasnosti i štetnosti na radnom mestu i u radnoj okolini, procenu rizika po zdravlje zaposlenih i utvrđivanje načina i mera za otklanjanje, smanjenje ili sprečavanje rizika [28]. Pored ostalih, u pravilniku su navedeni "štetni uticaji mikroklime (visoka ili niska temperatura, vlažnost i brzina strujanja vazduha)", kao i "štetni uticaji zračenja (toplotnog, jonizujućeg ili nejonizujućeg, laserskog, ultrazvučnog)".

Toplotno opterećenje nastaje udruženim dejstvom faktora radne okoline (temperatura, vlažnost i brzina strujanja vazduha i toplotno zračenje), izolacionih osobina odeće i fizičke težine posla, pa je rizik od toplotnog preopterećenja potrebno zasebno proceniti ako se prepozna. U Smernicama za bezbedan i zdrav rad na otvorenom pri visokim temperaturama, precizira se: „Poslodavac je dužan da Aktom o proceni rizika uzme u obzir i rizike po zdravlje zaposlenih koji rade na otvorenom pri visokim temperaturama." [29].

4. Nekoherentna optička zračenja

4.1. Uvod

Za potrebe zaštite zdravlja zaposlenih, vrše se *radiometrijska* ispitivanja optičkih zračenja. Od interesa je merenje stvarne snage zračenja na talasnim dužinama između 100 nm i 1 mm, bez obzira na to što samo mali deo zračenja u ovom opsegu pripada vidljivom delu spektra. Za razliku od radiometrije, fotometrija se bavi ljudskom percepcijom svetlosti i njene veličine zavisi od toga koliko dobro ljudsko oko vidi pojedine talasne dužine. Prema domaćem Pravilniku o preventivnim merama za bezbedan i zdrav rad pri izlaganju veštačkim optičkim zračenjima [30], ova zračenja su, po opsezima talasnih dužina, podeljena na:

- **ultraljubičasto (ultravioletno, UV) zračenje** – talasne dužine između 100 nm i 400 nm. Deli se na UVA (315 nm do 400 nm), UVB (280 nm do 315 nm) i UVC (100 nm do 280 nm);
- **vidljivo zračenje** – talasne dužine između 380 nm i 780 nm;
- **infracrveno zračenje** – talasne dužine između 780 nm i 1 mm. Deli se na IRA (780 nm do 1400 nm), IRB (1400 nm do 3000 nm) i IRC (3000 nm do 1 mm).

Zračenje talasnih dužina manjih od 200 nm, a posebno manjih od 180 nm, skoro potpuno se apsorbuje u vazduhu, te ima vrlo mali značaj u razmatranjima bioloških efekata [31]. Prema istom pravilniku, sva optička zračenja koja nisu laserska, nazivaju se „nekoherentna optička zračenja“ [30].

U praksi se sreću prirodni i veštački izvori optičkih zračenja. Posebno opasna su UV zračenja jer su nevidljiva i imaju veće energije fotona od drugih optičkih zračenja, pa su, samim tim, biološki destruktivnija i u manjim dozama. Od prirodnih izvora, najvažnije je zračenje Sunca, koje za većinu ljudi predstavlja nekontrolisanu ekspoziciju. Kako mnogi zaposleni obavljaju posao na otvorenom, ekspozicija je za njih neizbežna i za većinu njih je prirodno UV zračenje najvažniji izvor primljene doze. U letnjem periodu,

kada je vreme vedro, oko podneva, sa očima usmerenim ka Suncu, granica izlaganja od 30 J/m^2 za UV zračenje, preporučena od strane ICNIRP [31], može biti prekoračena za manje od 10 minuta [32]. Srećom, anatomske osobine čovekovog tela (položaj očiju, obrva, kosa...) i njegovo ponašanje (oblačenje, korišćenje šešira, naočara, zaštitnih krema...) omogućavaju mu da se na otvorenom zadrži mnogo duže bez posledica [32]. Izlaganje Suncu nije regulisano Pravilnikom [30] koji tretira samo veštačke izvore zračenja, ali je, prema Pravilniku o načinu i postupku procene rizika na radnom mestu i u radnoj okolini [28], obavezno prepoznavanje svih izvora rizika, što uključuje i prirodne izvore zračenja. Ostatak ovog odeljka biće posvećen veštačkim izvorima koji su regulisani Pravilnikom [30].

Od veštačkih izvora nekoherentnog UV zračenja, koji se sreću u industriji, najvažniji su aparati za zavarivanje i lampe za fotolitografiju, očvršćavanje boje, dezinfekciju ili medicinsku terapiju. Fluorescentne lampe za osvetljenje tipično sadrže živu, koja je isto izvor UV zračenja; ovo zračenje se pretvara u vidljivo u interakciji UV fotona sa fluorescentnom unutrašnjom oblogom staklenog kućišta. Deo ovog zračenja može neizmenjen napustiti ovakvu lampu (probijanje) izlažući zaposlene. Kako je UV zračenje nevidljivo, prilikom rada, ispitivač mora da vodi računa da i sam ne bude izložen tj. da ima odgovarajuća zaštitna sredstva i da, ako je moguće, isključi izvor prilikom postavljanja merne opreme. Pojedinim izvorima, kao što su fluorescentne lampe, potrebno je nekoliko minuta da dostignu maksimalnu snagu emisije UV zračenja, pa treba sačekati da taj period prođe pre početka merenja.

Ispitivana veličina zavisi od opsega talasnih dužina u kojem se štetna emisija nalazi, dela tela koji je izložen i mogućih posledica izlaganja. Dve osnovne ispitivane radiometrijske veličine su:

- **Iradijansa *E* [**W/m^2**]** ima fizički smisao snage zračenja (izražene u vatima W) koja pogađa izloženu površinu (izraženu u m^2). Snaga je energija protekla u jedinici vremena, pa je iradijansa ona količina svetlosne energije koja pogađa kvadratni metar izložene površine svake sekunde. Radiometrijska jedinica W/m^2 analogna je

fotometrijskom osvetljenju (iluminansi) koje se izražava u jedinicama luks (lx).

- **Radijansa *L* [**W/(m^2·sr)**]** predstavlja energiju zračenja koje se u jedinici vremena emituje sa jedinice površine (izražene u m^2) u jedinicu prostornog ugla (izraženog u sr (steradijanima)). Radijansa izražava snagu zračenja sa određene površine u određenom pravcu u prostoru, pa je stoga analogna fotometrijskom sjaju (luminansi) koji pokazuje koliko je neka površina sjajna kada se posmatra iz određenog pravca.

Ostale veličine biće objašnjene u sledećem odeljku.

Domaći pravilnik [30] propisuje upotrebu standarda SRPS EN 14255-1:2012 [33] i SRPS EN 14255-2:2012 [34] za ispitivanje individualnog izlaganja zaposlenih nekoherentnom optičkom zračenju. Ovi standardi dozvoljavaju upotrebu različitih instrumenata (odeljak 4.3), ali se za najpreciznija merenja koristi spektroradiometar sa odgovarajućom ulaznom optikom. Primeri u nastavku su dati uz pretpostavku korišćenja takvog instrumenta.

4.2. Postupak ispitivanja

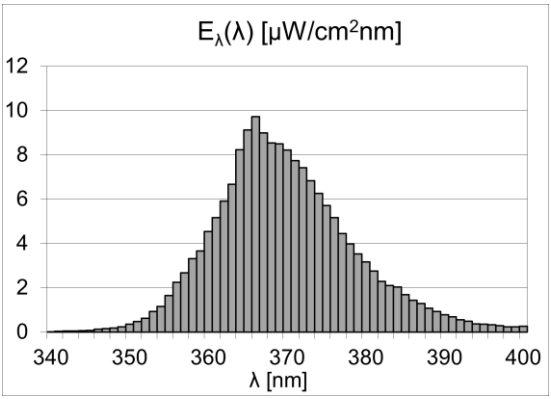
Radi lakšeg razumevanja, biće prikazana uobičajena procedura ispitivanja u skladu sa navedenim propisom i standardima. Na Slici 4.1 prikazan je spektroradiometar sa ulaznom optikom za merenje iradijanse. Ova optika uključuje difuzor sa kosinusnim odzivom koji je, ojačanim zaštićenim optičkim kablom, vezan za telo instrumenta. Nakon kompenzacije detektora na šum i pozadinsku svetlost, u skladu sa procedurom iz specifikacije proizvođača, snimljeni podaci se direktno očitavaju i snimaju pomoću prenosnog računara koji je povezan sa spektroradiometrom.

4.2.1. Iradijansa i radijantna ekspozicija

Iradijansa se meri tako da rezultati budu reprezentativni za ličnu izloženost, što podrazumeva orijentaciju detektora u skladu sa tipičnim položajem izložene kože ili očiju zaposlenog [33]. Sa ulaznom optikom prikazanom na Slici 4.1, spektroradiometar meri **spektralnu iradijansu $E_\lambda(\lambda)$**. To je funkcija

koja predstavlja raspodelu iradijanse *E* po talasnim dužinama *λ*. U praksi, to je niz brojeva koji predstavljaju izmerenu iradijansu na različitim talasnim dužinama. Na primer, ako je rezolucija instrumenta Δλ = 1 nm, a opseg u kome se zračenje ispituje od λ = 315 nm do λ = 400 nm (UVA), dobija se spektar zračenja u obliku vrednosti iradijanse na talasnim dužinama 315 nm, 316 nm, 317 nm itd. do 400 nm. Primer dela snimljenog spektra je prikazan na Slici 4.2.

Slika 4.1. Spektroradiometar sa ulaznom optikom za merenje iradijanse.



Slika 4.2. Deo snimljene spektralne iradijanse UV lampe za fotolitografiju.

Za obradu podataka, može se koristiti specijalizovani softver, a može i uobičajeni spreadsheet program, npr. Microsoft Excel®. U slučaju upotrebe spreadsheet-a, talasne dužine se upisuju u jednu kolonu, a odgovarajuće vrednosti spektralne iradijanse u drugu kolonu. **Ukupna iradijansa** se nalazi prema formuli [30]:

$$E_{UVA} = \sum_{\lambda=315\ \mathrm{nm}}^{400\ nm} E_\lambda(\lambda) \cdot \Delta\lambda \qquad (4.1)$$

Drugim rečima, ukupna iradijansa se nalazi sabiranjem svih vrednosti spektralne iradijanse E_λ u odgovarajućoj koloni spreadsheet-a, pomnoženih korakom talasne dužine odn. rezolucijom Δλ. U slučaju Δλ = 1 nm, što je najčešće dovoljno u praksi, nema potrebe ni za ovim množenjem, već se vrši samo sabiranje spektralnih komponenata E_λ.

Druga po redu, od 15 graničnih vrednosti izlaganja, datih tabelarno u Pravilniku [30], je $H_{UVA} = 10^4$ J/m^2 i važi za osmočasovno izlaganje sočiva oka UVA zračenju (315 nm do 400 nm). Da bi se od izmerene iradijanse E_{UVA} došlo do radijantne ekspozicije H_{UVA}, potrebno je iradijansu pomnožiti sa vremenom izlaganja Δt:

$$H_{UVA} = E_{UVA}\,\Delta t \tag{4.2}$$

Radijantna ekspozicija *H* **[**J/m^2**]** je ukupna energija predata jediničnoj površini izloženoj zračenju, u toku vremena izlaganja Δt. Ima smisao doze. Ukoliko se iradijansa menja tokom vremena izlaganja, *H* se računa integralom, ali je takva situacija retka u praksi. **Maksimalno dozvoljeno vreme izlaganja** se može dobiti iz formule 4.2 tako što se dozvoljena radijantna ekspozicija $H_{UVA} = 10^4$ J/m^2 podeli sa izmerenom iradijansom E_{UVA}.

Opisana procedura se koristi i za nalaženje ukupne iradijanse za indekse 13 i 14 u Tabeli 1.1 Pravilnika [30] odnosno za infracrveno zračenje talasnih dužina od 780 nm do 3000 nm, samo se menja opseg talasnih dužina. Za indeks 15 u istoj tabeli (380 nm do 3000 nm) koristi se već opisana procedura za nalaženje radijantne ekspozicije.

4.2.2. Efektivna iradijansa i efektivna radijantna ekspozicija

Efektivna iradijansa E_{eff} se dobija tako što se izmerena iradijansa spektralno ponderiše funkcijom S(λ) koja opisuje relativnu sposobnost pojedinih talasnih dužina zračenja da izazovu štetne efekte. U slučaju prve granične vrednosti u Tabeli 1.1 Pravilnika, u pitanju su fotokeratitis, fotokonjunktivitis, kataraktogneza, eritem, elastoza i kancer kože [30]. Opseg talasnih dužina je od 180 nm do 400 nm i ponderacija se obavlja primenom sledeće formule:

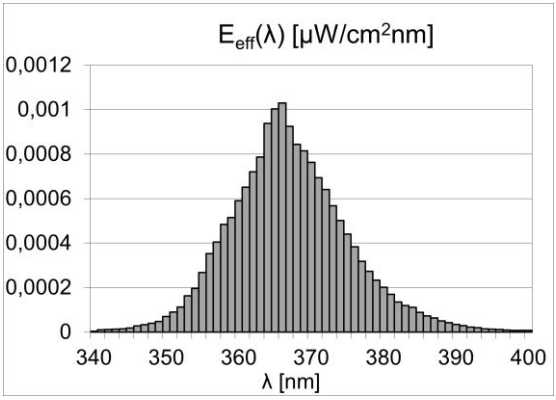
$$E_{eff} = \sum_{\lambda=180\ \mathrm{nm}}^{400\ nm} E_\lambda(\lambda) \cdot \mathrm{S}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \tag{4.3}$$

Na Slici 4.3 prikazana je upotreba ove formule u spreadsheet-u (vidljiv je samo deo opsega talasnih dužina, radi preglednosti). U prvoj koloni su talasne dužine, u drugoj izmerene vrednosti E_λ, a u trećoj S(λ) (čije vrednosti se nalaze u Pravilniku [30]).

λ	Eλ(λ)	S(λ)	Eλ(λ)*S(λ)
[nm]	[uW/cm^2/nm]		[uW/cm^2/nm]
...	...	...	...
360	4,5426507	0,00013	0,000590545
361	5,165561199	0,000126	0,000650861
362	5,907633305	0,000122	0,000720731
363	6,667273521	0,000118	0,000786738
364	8,233664513	0,000114	0,000938638
365	9,125497818	0,00011	0,001003805
366	9,72004509	0,000106	0,001030325
367	8,981708527	0,000103	0,000925116
368	8,527384758	0,000099	0,000844211
369	8,488045692	0,000096	0,000814852
370	8,207288742	0,000093	0,000763278
...	...	...	...

Slika 4.3. Deo spreadsheet-a za izračunavanje E_{eff}.

U četvrtoj koloni se izračunava proizvod $E_\lambda(\lambda)\cdot S(\lambda)$ za svaku talasnu dužinu. Pošto je $\Delta\lambda = 1$ nm, efektivna iradijansa E_{eff} se dobija sabiranjem svih brojeva u koloni $E_\lambda(\lambda)\cdot S(\lambda)$. Primer dela snimljene spektralne efektivne iradijanse $E_{eff}(\lambda) = E_\lambda(\lambda)\cdot S(\lambda)$ je prikazan na Slici 4.4.



Slika 4.4. Spektralna efektivna iradijansa UV lampe za fotolitografiju.

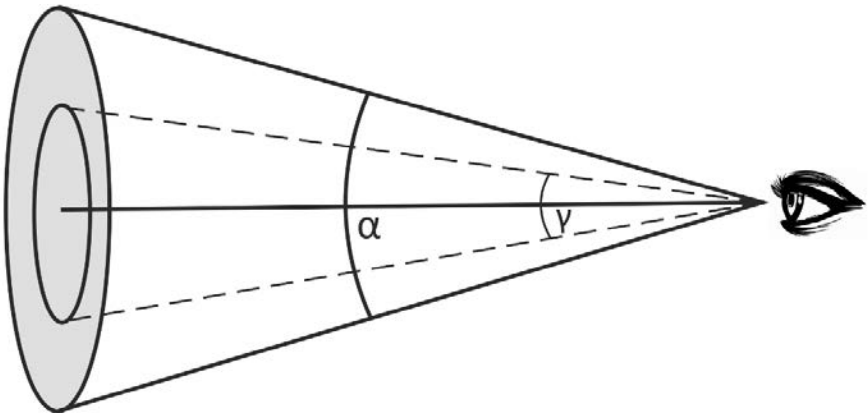
Za izračunavanje **efektivne radijantne ekspozicije H_{eff},** dobijenu E_{eff} treba pomnožiti sa trajanjem izlaganja Δt:

$$H_{eff} = E_{eff}\,\Delta t \tag{4.4}$$

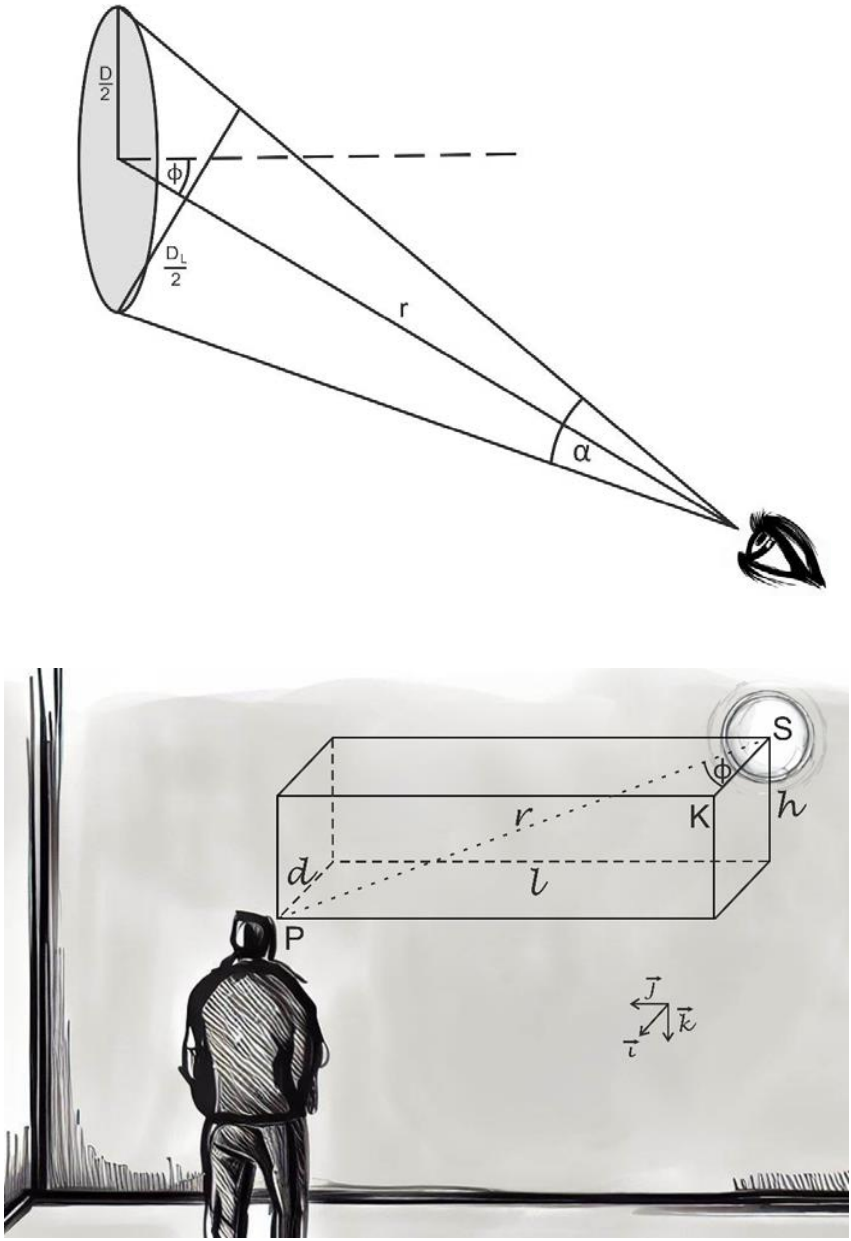
Opisana procedura se koristi i za dobijanje efektivne iradijanse E_B u opsegu od 300 nm do 700 nm (indeksi 5 i 6 u Tabeli 1.1. Pravilnika [30]), samo što se, za ponderaciju, umesto S(λ) koristi funkcija B(λ).

4.2.3. Radijansa i efektivna radijansa

Za merenje radijanse *L*, potrebna je posebna ulazna optika koja ograničava vidno polje (engl. field of view, FOV) odnosno ugao prihvata detektora (engl. angle of acceptance) γ na relativno malu vrednost, kako bi bila zahvaćena manja površina od cele površine ispitivanog izvora. Ova optika se obično sastoji iz cevi sa otvorom koji ograničava vidno polje (engl. limiting aperture), sistema sočiva i sistema za nišanjenje odn. definisanje površine izvora koji se ispituje.



Slika 4.5. Ugao pod kojim se vidi izvor (α) i ugao prihvata detektora (γ).



Slika 4.6. Geometrija ispitivanja radijanse.

Na Slici 4.5 je prikazana površina izvora na koju je usmeren detektor predstavljen kao oko posmatrača. Iz položaja posmatrača, ceo izvor se vidi pod uglom α, ali optika prihvata zračenje iz manjeg ugla γ. Sa slike se vidi da, sa povećanjem udaljenosti detektora od izvora, uz isti ugao γ, biva zahvaćena veća površina izvora. Odatle, ako je izvor dovoljno velik, ravan i homogen (jednako zrači iz svih svojih tačaka), radijansa je nezavisna od udaljenosti, jer se i uzorkovana površina (zahvaćena uglom γ) povećava sa povećanjem rastojanja [35]. Treba naglasiti da se, u standardu i propisima, pojednostavljeno koriste "obični" lučni uglovi, izraženi u radijanima, umesto prostornih uglova.

U nastavku će biti opisano spektroradiometrijsko određivanje efektivne radijanse L_b (opseg 300 nm do 700 nm) po Metodu F iz Aneksa E standarda SRPS EN 14255-2:2012 [34] propisanog domaćim Pravilnikom [30].
Na Slici 4.6 gore, prikazano je oko (detektor) koje posmatra izvor svetlosti kružnog oblika, prečnika D, sa udaljenosti *r* (udaljenost od oka odn. detektora do centra izvora). Ugao posmatranja φ je ugao između normale izvora i pravca *r*, a α je ugao pod kojim se vidi izvor. Prvi korak je izračunavanje ugla α, jer od njega zavisi da li se uopšte meri radijansa ili ne, kao i koja se granična vrednost primenjuje.

Prema Slici 4.6 gore, zbog ugla posmatranja φ, izvor ima prividni prečnik D_L izražen relacijom:

$$D_L = D \cdot cos\varphi \tag{4.5}$$

Na taj način se, polazeći od D i φ, najpre izračuna D_L. Ukoliko je stvarni izvor kružnog oblika, uzima se njegov prečnik D. Ukoliko je izdužen, za D se usvaja aritmetička sredina njegove najduže i najkraće dimenzije [34].

Udaljenost *r* i ugao φ se mogu neposredno meriti, npr. *r* primenom laserskog daljinomera, ali ih je često lakše odrediti merenjem dužina stranica *d, l* i *h,* zamišljenog kvadra prikazanog na Slici 4.6 dole. Slika ilustruje tipičan merni scenario u kome je posmatrač P na udaljenosti *d* od zida. Na zidu se nalazi izvor optičkog zračenja S, koji je od posmatrača na horizontalnoj udaljenosti *l* (mereno po površini zida), i viši je za *h* u odnosu na njega.

Udaljenost *r* je velika dijagonala kvadra i može se izračunati na osnovu njegovih stranica:

$$r = \sqrt{h^2 + l^2 + d^2} \tag{4.6}$$

Ugao φ se može izračunati na osnovu formule za skalarni proizvod vektora:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot \left|\vec{b}\right| \cdot cos\theta$$

gde je θ ugao između vektora $\vec{a}\ i\ \vec{b}$. Odavde je:

$$cos\theta = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot \left|\vec{b}\right|} \tag{4.7}$$

Ugao φ je definisan kao ugao između normale izvora SK i pravca SP pod kojim posmatrač vidi izvor. Prema Slici 4.6 dole, usvajamo sredinu izvora S kao referentnu tačku, a jedinične vektore $\vec{\imath}, \vec{\jmath}\ i\ \vec{k}$ kao na slici. Odatle je normala izvora $\overrightarrow{\mathrm{SK}}$ u pravcu orta $\vec{\imath}$, i to je vektor <*d*, 0, 0>. To znači da mu je intenzitet u pravcu $\vec{\imath}$ jednak *d* (dužina duži SK), dok su mu komponente u ostala dva pravca jednake nuli.

Što se tiče vektora $\overrightarrow{\mathrm{SP}}$, čiji intenzitet odgovara dužini *r*, njegove komponente su *d, l* i *h* u pravcima $\vec{\imath}, \vec{\jmath}\ i\ \vec{k}$ respektivno. Odatle je $\overrightarrow{\mathrm{SP}} = \langle d, l, h \rangle$.

Sada se može primeniti formula 4.7 radi nalaženja ugla φ:

$$cos\varphi = \frac{\overrightarrow{SK} \cdot \overrightarrow{SP}}{\left|\overrightarrow{SK}\right| \cdot \left|\overrightarrow{SP}\right|} = \frac{\langle d, 0, 0 \rangle \cdot \langle d, l, h \rangle}{d \cdot r} = \frac{d \cdot d + 0 \cdot l + 0 \cdot h}{d \cdot r} = \frac{d^2}{d \cdot r}$$

$$cos\varphi = \frac{d}{r} \tag{4.8}$$

Ovaj rezultat se može dobiti i klasičnom trigonometrijom trougla SPK, ali je vektorski račun pogodan zbog toga što važi i u opštem slučaju, kada normala izvora nije ujedno i normala na površinu zida.

Uvršćavanjem rezultata (formula 4.8) u formulu 4.5 dobija se:

$$D_L = D \cdot cos\varphi = D \cdot \frac{d}{r} \tag{4.9}$$

Sa Slike 4.6 gore, vidi se trigonometrijska relacija D_L, r i tangensa ugla α/2. Za male uglove α važi aproksimacija tg(α/2) ≈ α/2 i odatle:

$$\frac{\frac{D_L}{2}}{r} = tg\frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$$

Odavde:

$$\alpha \approx \frac{D_L}{r} \tag{4.10}$$

Ova relacija je navedena i u standardu [34]. Uvršćavanjem relacije 4.9 u 4.10, uz primenu relacije 4.6, dobija se:

$$\alpha \approx \frac{D_L}{r} = \frac{1}{r} \cdot D \cdot \frac{d}{r} = \frac{d \cdot D}{r^2} = \frac{d \cdot D}{h^2 + l^2 + d^2} \tag{4.11}$$

Nakon što je izračunato α, prema standardu i Pravilniku, radijansa u opsegu 300 nm do 700 nm se meri samo ako je ugao α veći ili jednak 11 mrad. Ako je α < 11 mrad, određuje se efektivna iradijansa E_B na način opisan u odeljku 4.2.2, samo što se za ponderaciju koristi funkcija B(λ) data u Pravilniku i dobijena vrednost poredi sa udgovarajućim graničnim vrednostima iz Tabele 1.1 (indeksi 5 i 6) Pravilnika [30].

Ako je α ≥ 11 mrad, može se meriti radijansa, ali je potrebno proveriti da li je ugao prihvata detektora dovoljno mali, tj. potrebno je da γ bude manji ili jednak uglu pod kojim se vidi izvor (α). Merenje radijanse je validno samo pod uslovom da je γ ≤ α, odnosno da vidno polje zahvaćeno uglom γ (koje

vidi detektor) obuhvata površinu manju od površine izvora (Slika 4.5). Ovaj uslov, kao i uslov da γ generalno ne može biti veće od 100 mrad, propisan je standardom [34]. Standard takođe propisuje i sposobnost detektora da razlučuje nehomogenosti izvora do 11 mrad ukoliko je izvor nehomogen.

Nakon što se očita i snimi spektralna radijansa $L_\lambda(\lambda)$, vrši se njena ponderacija funkcijom B(λ) datom u Pravilniku [30], primenom formule:

$$L_B = \sum_{\lambda=300\,\mathrm{nm}}^{700\,nm} L_\lambda(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

U praksi se ova ponderacija realizuje na isti način kao i ponderacija po formuli 4.3, samo što je drugačiji opseg talasnih dužina, druga je funkcija ponderacije i dobija se **efektivna radijansa L_B** za plavu svetlost, koja se poredi sa referentnim vrednostima iz Tabele 1.1 (indeksi 3 i 4) Pravilnika [30].

Na sličan način se određuje efektivna radijansa i za druge opsege talasnih dužina, samo što se primenjuju drugačije funkcije ponderacije, drugi opsezi talasnih dužina i drugačiji kriterijumi za ugao α.

4.3. Merna instrumentacija

Standardi SRPS EN 14255-1:2012 [33] i SRPS EN 14255-2:2012 [34] opisuju različite metode ispitivanja, u zavisnosti od vrste instrumenta koji se koristi. Ovi instrumenti mogu biti:

- **Spektroradiometri sa matričnim detektorom** – registruju sve talasne dužine zračenja istovremeno, zahvaljujući tome što je detektor spektra realizovan kao matrica detektora koji rade istovremeno. Detektori u okviru matrice registruju zračenje na pojedinim talasnim dužinama, čime se dobija spektar (raspodela zračenja po talasnim dužinama).
- **Spektroradiometri sa skenirajućim monohromatorom** – snimaju zračenje različitih talasnih dužina jedno po jedno. Rezultat je

raspodela zračenja po talasnim dužinama, ali uz ograničenje da u toku skeniranja ne sme doći do promene spektralne raspodele intenziteta ispitivanog zračenja.

- **Širokopojasni instrumenti** ne prikazuju spektar, već ukupno zračenje detektovano u opsegu talasnih dužina za koje je instrument namenjen. Detektor može biti realizovan sa ili bez funkcije ponderacije. Ukoliko je realizovan bez funkcije ponderacije, može se koristiti za određivanje npr. ukupne iradijanse (formula 4.1). Za određivanje npr. efektivne iradijanse (formula 4.3), mogu se koristiti širokopojasni instrumenti sa odgovarajućom funkcijom ponderacije S(λ) (ili nekom drugom, zavisno od namene).
- **Dozimetri** se obično realizuju za UV zračenje i najčešće imaju implementiranu neku vrstu spektralne ponderacije.

Vrsta instrumenta ograničava šta se njime i koliko kvalitetno može ispitati. Širokopojasni instrumenti su obično jeftiniji i jednostavniji za upotrebu, jer odmah pokazuju ukupnu iradijansu ili radijansu u opsegu talasnih dužina od interesa. Ukoliko je neslaganje funkcije spektralne osetljivosti širokopojasnog detektora sa standardom definisanom funkcijom ponderacije velika, to povlači veliku mernu nesigurnost [34]. Ovi instrumenti, takođe, ne pokazuju na kojim talasnim dužinama ispitivani izvor zrači, već samo ukupno detektovano zračenje u opsegu za koji je instrument projektovan. To umanjuje mogućnost precizne karakterizacije zračenja, jer se ispitivač mora osloniti na tehničku dokumentaciju o izvoru, da iz nje dobije uvid u spektralni sadržaj. Ako je širokopojasni instrument namenjen merenju samo neponderisanog zračenja, on neće moći da se koristi za određivanje spektralno ponderisanog (efektivnog) zračenja. Ako je, međutim, realizovan samo za merenje spektralno ponderisanog zračenja, onda neće moći da se koristi za merenje ukupnog (neponderisanog) zračenja.

Spektroradiometri omogućavaju najtačnije i najpreciznije određivanje i ponderisanog i neponderisanog zračenja, pod uslovom da su zadovoljeni metrološki zahtevi, pre svega potiskivanje zalutale svetlosti (engl. stray light rejection). Zalutala svetlost je svetlost registrovana na detektoru određene talasne dužine, koja nije te talasne dužine. Na primer, u prisustvu

infracrvenog zračenja, iako bi monohromator trebalo da izoluje UV talasnu dužinu od 350 nm, na detektor komponente 350 nm može zalutati određeni deo infracrvenog zračenja, što daje lažno pokazivanje od 350 nm. Instrument mora imati dovoljno veliko potiskivanje zalutale svetlosti da bi ovaj efekat bio dovoljno mali. Ovaj problem je dosta izražen pri merenju UV zračenja Sunca, za koje mnogi spektroradiometri nisu uopšte pogodni, ali nije tako značajan kod ispitivanja veštačkih izvora. Pored zahteva u pogledu potiskivanja zalutale svetlosti, spektroradiometar treba da ima i odgovarajuću rezoluciju i da pokriva opseg talasnih dužina u kome se ispitivano zračenje nalazi.

5. Merna nesigurnost

5.1. Uvod

Cilj merenja je da se sa što većom tačnošću proceni veličina od interesa. Njenu stvarnu vrednost nikada nije moguće spoznati sa stoprocentnom verovatnoćom, pa se svakom rezultatu merenja pridružuje određena nesigurnost. Nakon što procenimo merenu veličinu, obično usrednjavanjem više rezultata merenja, nesigurnost se izražava kao interval oko dobijene vrednosti u kome se stvarna vrednost nalazi sa određenom verovatnoćom. Ako srednju vrednost označimo sa *M*, interval oko nje označavamo sa ±*U* (engl. *U* – uncertainty, nesigurnost) i rezultat prikazujemo kao *M*±*U*. U praksi se najčešće u intervalu *M*±*U* očekuje 95 % rezultata, o čemu će biti reči u nastavku.

Osim pojma nesigurnosti, postoji i pojam greške, koji predstavlja razliku između izmerene i stvarne vrednosti merene veličine. Kako stvarnu vrednost nikada nije moguće tačno utvrditi, tako nije moguće tačno utvrditi ni grešku.

5.2. Izvori merne nesigurnosti

Izvori (doprinosi) merne nesigurnosti su svi efekti koji proizvode odstupanja izmerene od stvarne vrednosti merene veličine. Njih je potrebno prepoznati, maksimalno umanjiti, što tačnije kvantifikovati i uračunati u konačnu procenu *kombinovane merne nesigurnosti* koja uzima u obzir sve značajne doprinose.

Izvori nesigurnosti zavise od vrste i načina merenja, što je pre svega uslovljeno veličinom koja se meri, ali u skoro svim slučajevima postoje i moraju se uzeti u obzir:

- nesigurnost usled neidealne ponovljivosti (kada se merenje iste veličine ponavlja pod istim uslovima [36]);
- nesigurnost poreklom od mernih instrumenata (obično se može pročitati u specifikacijama proizvođača) i

- nesigurnost etaloniranja (iz dokumentacije o etaloniranju).

U obzir se moraju uzeti i svi drugi izvori nesigurnosti koji nisu zanemarljivi u odnosu na ostale doprinose. Ponekada je moguće više izvora objediniti u zajedničku ocenu, npr. proizvođač često u specifikaciji iskazuje nesigurnost čitavog mernog lanca (senzor, pojačavač, kabl, obrada signala itd.) pa se tada ona ne mora računati na osnovu nesigurnosti zasebnih komponenata. Doprinose koji su značajno manji od dominantnih, mogu se izostaviti iz proračuna.

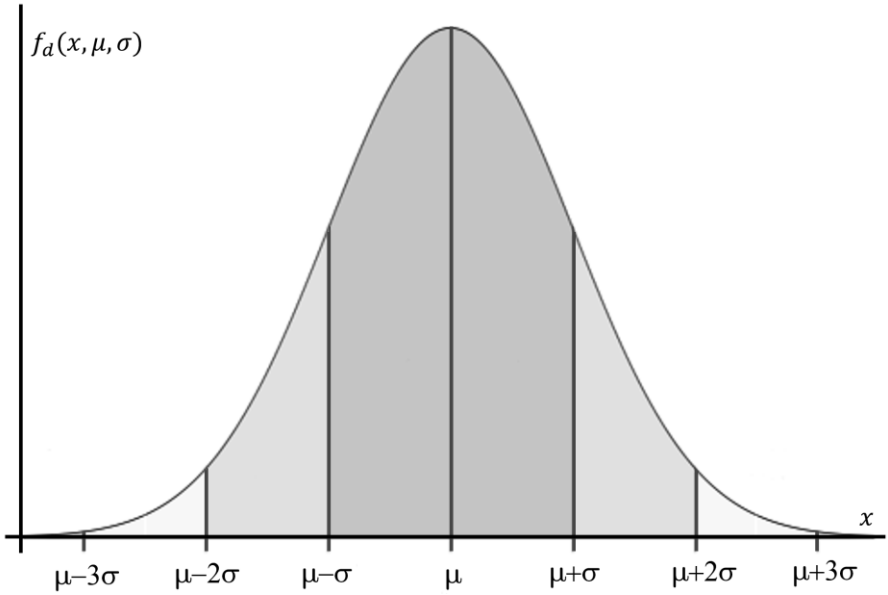
Efekti koji utiču na mernu nesigurnost mogu biti *slučajni* i *sistematski*. Slučajni efekti proizvode odstupanja svakog individualnog rezultata merenja od stvarne vrednosti na nepredvidiv način, ali je njihov uticaj moguće umanjiti ponavljanjem merenja pod istim uslovima. Sistematski efekti u svim pojedinačnim merenjima proizvode odstupanja na predvidiv način i u istom pravcu. Primera radi, skala termometra može biti pomerena tako da uvek pokazuje 0,5 °C više. Te efekte nije moguće umanjiti usrednjavanjem ponovljenih merenja, pa je korisno prepoznati ih i eliminisati ukoliko situacija to dozvoljava. Konzistentna odstupanja se često mogu eliminisati uvođenjem pogodnih korekcija (u navedenom primeru, umanjenje svih rezultata za 0,5 °C). Ako ih ipak nije moguće eliminisati, treba ih uračunati u kombinovanu mernu nesigurnost na isti način kao i slučajne efekte.

5.3. Raspodele verovatnoće

5.3.1. Normalna raspodela

Kod ponovljenih merenja iste veličine na isti način, obično se primećuje da se rezultati grupišu oko neke srednje vrednosti, gde se javlja veća gustina rezultata, a kako se od nje udaljujemo, sve je manja verovatnoća da ćemo dobiti tako udaljen rezultat. Ako se ovo grafički prikaže, dobija se dijagram *raspodele verovatnoće*. U slučaju merenja fizičkih veličina koje su ovde od interesa, kriva najčešće ima oblik *normalne raspodele* (Slika 5.1). Na horizontalnoj osi se nalaze izmerene vrednosti veličine *x*, a na vertikalnoj je relativna verovatnoća da te vrednosti dobijemo. Po konvenciji, oznaka μ je srednja vrednost, a σ standardna devijacija (detaljnije objašnjenja u odeljku

5.4). Ova dva parametra u potpunosti definišu oblik krive normalne raspodele slučajne promenljive *x*. Vrednost σ određuje širinu krive.



Slika 5.1. Normalna raspodela verovatnoće.

Matematička formula za normalnu raspodelu je:

$$f_d(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{5.1}$$

Prikazana funkcija f_d je, zapravo, *gustina verovatnoće* (engl. *d* – density, gustina): što su rezultati „gušće skoncentrisani" u nekom opsegu vrednosti *x*, to je tu veća vrednost f_d. Kod normalne raspodele, najveći broj rezultata merenja očekujemo u okolini srednje vrednosti μ, pa je tu i gustina rezultata najveća i time je najveća i vrednost f_d.

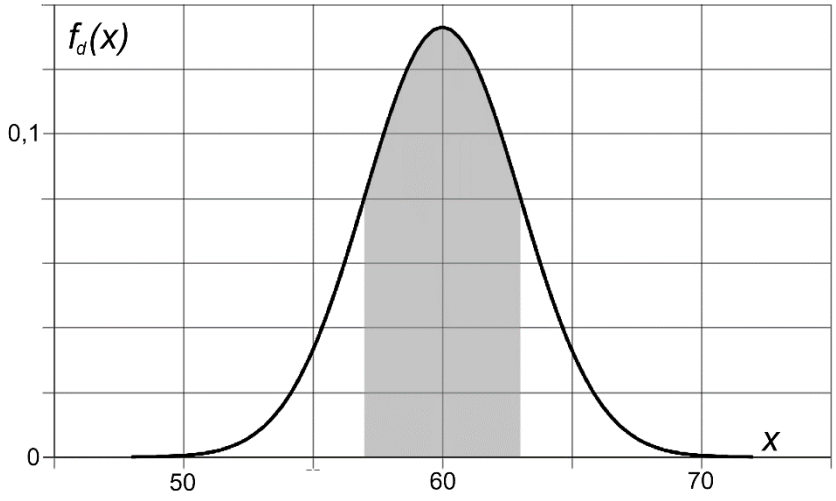
Integracijom funkcije f_d računamo verovatnoću da rezultat bude u određenom opsegu. Integraciju, uprošćeno, možemo interpretirati kao računanje površine ispod krive (zatamnjeni deo). Konstante u formuli 5.1 su izabrane tako da se integracijom po celom opsegu mogućih vrednosti *x* (od -∞ do +∞) dobija 1, odnosno verovatnoća od 100 %.

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} f_d(x, \mu, \sigma) dx = 1$$

To znači da smo 100 % sigurni da je rezultat u opsegu od -∞ do +∞ (tzv. normiranje). Kada je to obezbeđeno, moguće je izračunati verovatnoću da se rezultat nađe u nekom drugom, užem opsegu.

Primer 1. Srednja vrednost je μ = 60, a standardna devijacija σ = 3. Koliko rezultata možemo očekivati u opsegu *x* = 60±3 ? Koristeći formulu 5.1, uvrstivši μ = 60 i σ = 3, dobijamo:

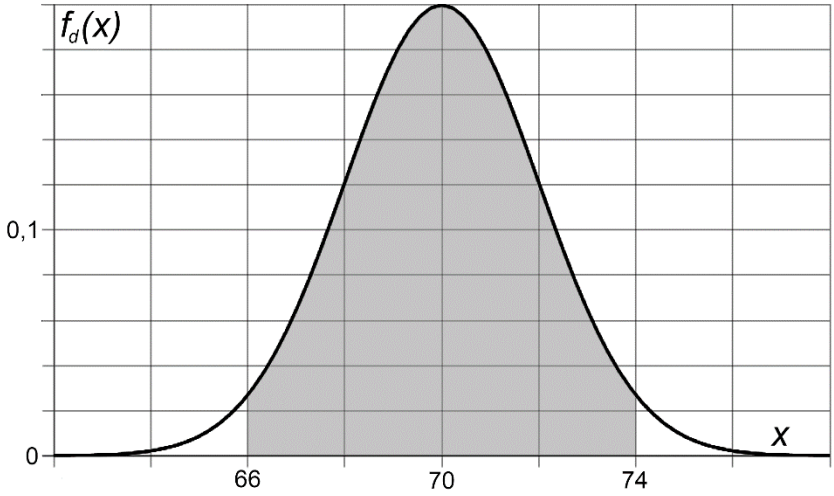
$$P = \int_{60-3}^{60+3} f_d(x, 60, 3)\,\mathrm{dx} = 0{,}683$$



Dakle, 68,3 % svih dobijenih rezultata *x* možemo očekivati u tom opsegu. To takođe znači da, za svaki sledeći rezultat, postoji verovatnoća 68,3 % da će se naći u tom opsegu. U opštem slučaju, za bilo koju normalnu raspodeljenu slučajnu promenljivu, 68,3 % rezultata nalazimo u opsegu od μ−σ do μ+σ.

Primer 2. Srednja vrednost je μ = 70, a standardna devijacija σ = 2. Kolika je verovatnoća da se pojedinačni rezultat nađe u opsegu *x* = 70±4 ? Na isti način:

$$P = \int_{70-4}^{70+4} f_d(x, 70, 2)\,\mathrm{dx} = 0{,}955$$

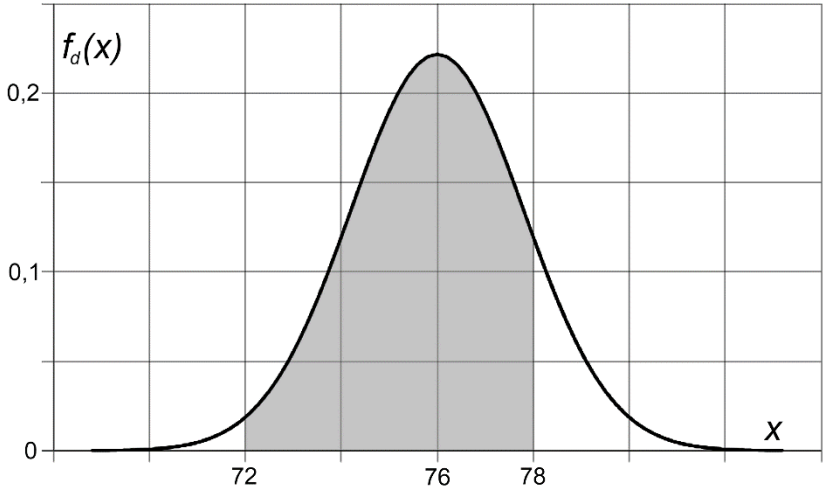


Tražena verovatnoća je 95,5 %. U opštem slučaju, kod normalne raspodele, ova verovatnoća odgovara opsegu od μ-2σ do μ+2σ.

Primer 3. Srednja vrednost je μ = 76, a standardna devijacija σ = 1,8. Kolika je verovatnoća da se pojedinačni rezultat nađe u opsegu od 72 do 78? Ovaj interval je asimetričan u odnosu na μ, ali se računica sprovodi na isti način,

integracijom funkcije gustine verovatnoće $f_d(x, \mu=76, \sigma=1{,}8)$ u intervalu od x=72 do x=78:

$$P = \int_{72}^{78} f_d(x, 76, 1{,}8)\,\mathrm{dx} = 0{,}854$$



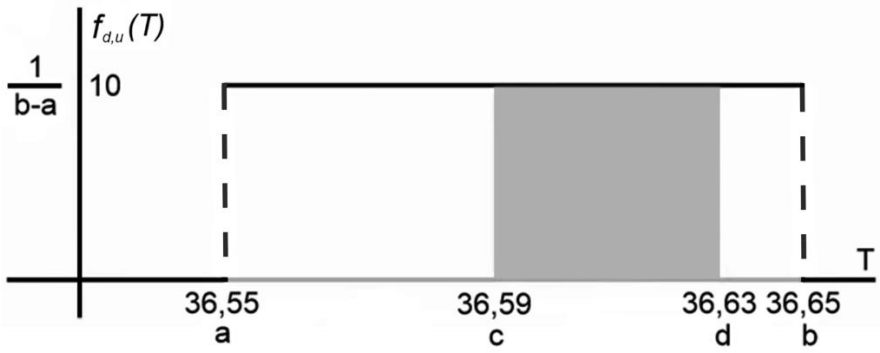
Tražena verovatnoća je 85,4 %. Na isti način, uz poznatu funkciju gustine verovatnoće f_d, može se naći verovatnoća nalaženja rezultata u bilo kom opsegu. Ova činjenica će biti potrebna za razumevanje računanja merne nesigurnosti buke i vibracija u kasnijim primerima.

Normalna raspodela je značajna u teoriji merenja i zbog *Centralne granične teoreme*. Ne ulazeći u detalje, na osnovu nje se može zaključiti da, kada postoji dovoljno različitih izvora nesigurnosti koji utiču na rezultat merenja, taj rezultat će biti normalno raspodeljen, bez obzira na to kako su raspodeljeni faktori koji opisuju izvore nesigurnosti [37]. U praksi je obično dovoljno samo tri nezavisna doprinosa nesigurnosti, porediva po svom uticaju na rezultat.

5.3.2. Uniformna raspodela

Zamislimo da vršimo merenje temperature na dva načina: digitalnim termometrom sa korakom 0,1 °C i pomoću živinog termometra sa podeocima od po 0,1 °C. Ukoliko digitalni termometar pokazuje temperaturu 36,6 °C, stvarna temperatura može biti 36,62 °C, ali može biti i 36,59 °C ili 36,64 °C. Nemamo informaciju o ostalim ciframa iza poslednje prikazane. Jednako je verovatno da stvarna temperatura ima bilo koju od vrednosti u opsegu od 36,55 °C do 36,65 °C, pa kažemo da je tada verovatnoća *uniformno raspodeljena*. Ova raspodela izgleda kao na Slici 5.2: gustina verovatnoće $f_{d,u}(T)$ je ista za sve vrednosti T između 36,55 °C i 36,65 °C, a van ovog opsega je verovatnoća nula.

Slična situacija je i kod očitavanja termometra sa živom: ako je skala podeljena na korake od po 0,1 °C a očitana je temperatura 36,6 °C, jednaka je verovatnoća da je stvarna vrednost bilo gde u opsegu od 36,55 °C do 36,65 °C. Verovatnoća da se očita rezultat 36,6 °C ako je stvarna vrednost van ovog opsega, jednaka je nuli, pa se dobija ista raspodela verovatnoće kao na Slici 5.2.



Slika 5.2. Uniformna raspodela verovatnoće.

Ako želimo da izračunamo verovatnoću da je stvarna vrednost u nekom drugom opsegu, to činimo integracijom funkcije gustine verovatnoće $f_{d,u}(T)$ kao i kod normalne raspodele, ali se ovde integracija odn. izračunavanje površine ispod krive svodi na računanje površine pravougaonika. Kada

očitamo 36,6 °C, znamo da je verovatnoća 100 % da je stvarna vrednost negde u opsegu od 36,55 °C do 36,65 °C i podesićemo vrednosti na vertikalnoj osi tako da ukupna površina pravougaonika bude 1, što odgovara verovatnoći 100 %. Na taj način obezbeđujemo normiranje funkcije $f_{d,u}(T)$. Ako usvojimo a=36,55 i b=36,65, onda je dužina horizontalne stranice pravougaonika b-a=0,1. Da bi ukupna površina pravougaonika bila 1, potrebno je da vertikalna stranica ima dužinu 1/(b-a)=10.

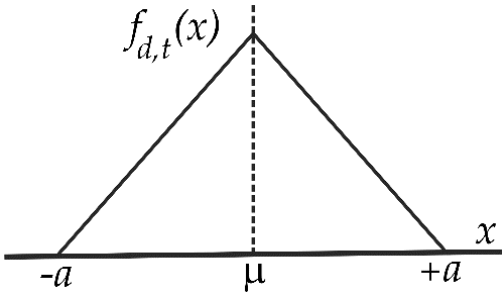
Ovako normiranu funkciju $f_{d,u}(T)$ možemo koristiti da izračunamo verovatnoću da se stvarna vrednost nalazi u nekom drugom opsegu. Na primer, verovatnoća da je vrednost između c=36,59 °C i d=36,63 °C dobija se integracijom $f_{d,u}(T)$ odn. računanjem zatamnjene površine na Slici 5.2. Horizontalna stranica zatamnjenog pravougaonika je d-c=0,04 °C, pa je njegova površina:

$$P = \int_{c}^{d} f_{d,u}(T)dT = (d-c)\cdot\left(\frac{1}{b-a}\right) = 0{,}04\cdot 10 = 0{,}4$$

Tražena verovatnoća je, dakle, 40 %.

5.3.3. Trougaona raspodela

Pored normalne i uniformne, postoje i druge raspodele, ali se one ređe koriste u metrologiji.



Slika 5.3. Trougaona raspodela verovatnoće.

U slučaju da znamo granice raspodele (od *-a* do *+a*) i očekujemo da su rezultati skoncentrisaniji u blizini srednje vrednosti μ, ali ne znamo kako su raspoređeni unutar tih granica, možemo koristiti trougaonu raspodelu (Slika 5.3) [38].

Čisto informativno, navodimo jedan primer: u prostoriji se kontroliše temperatura pomoću termostata i podešena je na 23 °C, a sistem reaguje na odstupanja veća od 2 °C. Informacije koje imamo su da su temperature grupisane oko srednje vrednosti od 23 °C i da se temperatura nalazi negde između 21 °C i 25 °C, ali nemamo dodatne informacije o njenoj raspodeli u ovom opsegu.

5.4. Standardna devijacija i standardna devijacija srednje vrednosti

Videli smo da je standardna devijacija σ parametar koji određuje širinu krive kod normalne raspodele. Ovaj parametar je, dakle, mera rasipanja rezultata pojedinačnih merenja oko srednje vrednosti: što je σ veće, veće je i rasipanje, pa je kriva normalne raspodele šira. Ukoliko ponovimo npr. merenje temperature *n* puta, srednju vrednost T_{sr} nalazimo kao aritmetičku sredinu tih *n* rezultata:

$$\mu = T_{sr} = \frac{T_1 + T_2 + \ldots + T_n}{n} \tag{5.2}$$

Standardnu devijaciju tada nalazimo primenom sledeće formule:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(T_1 - T_{sr})^2 + (T_2 - T_{sr})^2 + \ldots + (T_n - T_{sr})^2}{n - 1}} \tag{5.3}$$

Standardna devijacija, kao mera rasipanja pojedinačnih rezultata, ne smanjuje se kako se povećava broj merenja *n*. Primećuje se, međutim, da što se više puta ponovi merenje, srednja vrednost T_{sr} je sve preciznije

određena, tj. sve se više sužava opseg u kojem očekujemo da će se T_{sr} naći. Ova *nova promenljiva* T_{sr}, dobijena usrednjavanjem izmerenih temperatura, ima *manje rasipanje* od pojedinačnih rezultata merenja. Mera rasipanja te nove promenljive T_{sr} zove se *standardna devijacija srednje vrednosti* (s_M ili engl. SDM – Standard Deviation of the Mean) i računa se po formuli:

$$s_M = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{5.4}$$

Iz formule 5.4 uočava se da se s_M smanjuje kako se povećava broj pojedinačnih merenja n. Ako bismo više puta ponovili eksperiment i svaki put izmerili npr. 30 puta temperaturu pod istim uslovima i na isti način, pa svaki put našli srednju vrednost tih 30 rezultata i to smatrali rezultatom eksperimenta, ta srednja vrednost T_{sr} bi imala rasipanje:

$$s_M = \frac{\sigma}{\sqrt{30}}$$

Nova promenljiva T_{sr} ima manje rasipanje s_M od rasipanja σ pojedinačnih rezultata merenja temperature, zahvaljujući usrednjavanju. *Kada se prikazuje rezultat dobijen usrednjavanjem više pojedinačnih rezultata merenja, kao mera rasipanja prikazuje se* s_M. Sa dovoljno velikim brojem uzoraka, nova promenljiva T_{sr}, prema Centralnoj graničnoj teoremi, ima normalnu raspodelu bez obzira kako je raspodeljena promenljiva koju uzorkujemo (u ovom slučaju temperatura). Ovako dobijena standardna devijacija srednje vrednosti može se, u daljim proračunima, tretirati kao da odgovara normalno raspodeljenoj promenljivoj.

5.5. Standardna nesigurnost

Prema Vodiču za izražavanje nesigurnosti u merenjima, standardna nesigurnost u je nesigurnost rezultata merenja izražena kao standardna devijacija [36].

Kada se standardna devijacija određuje na osnovu ponovljenih merenja i koristi za procenu nesigurnosti, to se naziva procena nesigurnosti *tipa A*. Ako

se procena vrši na neki drugi način, npr. preuzimanjem informacija iz stručne literature, sertifikata o etaloniranju i uputstava za merne instrumente, baza podataka ili izveštaja ranijih ispitivanja, iskustva i sl. to je procena nesigurnosti *tipa B*.

U slučaju normalne raspodele, kako smo videli u primerima u odeljku 5.3.1, verovatnoća da se stvarna vrednost nalazi u opsegu μ±σ je 68,3 % a da se nađe u opsegu μ±2σ je 95,5 %. U praksi je potrebna veća pouzdanost, pa se obično usvaja 95,5 % verovatnoća, što odgovara 2σ-intervalu. Broj kojim se množi σ naziva se *faktor obuhvata* (engl. coverage factor, u našem slučaju 2). Kada se standardna nesigurnost *u* pomnoži faktorom obuhvata *k*, dobija se *proširena nesigurnost U*:

$$U = k \cdot u \tag{5.5}$$

Primena standardne devijacije za određivanje nesigurnosti je pogodna zato što se može izračunati i za veličine koje nisu normalno raspodeljene. Primer takve promenljive izložen je u odeljku 5.3.2. Doprinosi nesigurnosti koji potiču od sistematskih efekata se takođe mogu uračunati. Kada se uzmu u obzir svi izvori nesigurnosti koji značajno doprinose ukupnoj nesigurnosti rezultata i izraze preko standardne nesigurnosti, može se izračunati *kombinovana standardna nesigurnost*.

5.5.1. Kombinovana standardna nesigurnost

Kada se svi doprinosi nesigurnosti odnose se na istu veličinu i izraženi su u istim jedinicama, što je obično slučaj kod direktnih merenja, kombinovana nesigurnost u_c računa se sabiranjem doprinosa različitih izvora nesigurnosti u kvadraturi:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \ldots + u_N^2} \tag{5.6}$$

Ovde su u_1, u_2, ... , u_N standardne nesigurnosti iz različitih izvora. Direktna merenja su ona gde instrument neposredno pokazuje potreban rezultat i nije potrebno vršiti dalja izračunavanja.

Primer: Merenje temperature digitalnim instrumentom. Kao rezultat *n*=30 ponovljenih merenja, srednja izmerena temperatura, primenom formule 5.2 je 36,6 °C. Identifikovani su sledeći izvori merne nesigurnosti:

1. Ponovljivost se ocenjuje statističkom analizom serije rezultata merenja, pa je to procena nesigurnosti tipa A. Ako smo, primenom formule 5.3, dobili npr. σ=0,72 °C, deljenjem sa √30, prema formuli 5.4, dobijamo s_M= 0,13 °C. Prema tome, nesigurnost usled neidealne ponovljivosti je u_1= 0,13 °C.

2. Nesigurnost instrumenta prema dokumentaciji je ±0,2 °C. Ukoliko u dokumentaciji proizvođača nema dodatnih informacija o raspodeli i faktoru obuhvata, moramo da pretpostavimo uniformnu raspodelu tj. da deklarisanu nesigurnost podelimo sa *deliteljem za uniformnu raspodelu koji je √3*. Standardna nesigurnost iz ovog izvora je onda:

$$u_2 = \frac{0{,}2}{\sqrt{3}} = 0{,}12\ ^\circ\mathrm{C}$$

3. Nesigurnost etaloniranja može se pročitati iz sertifikata o etaloniranju. Laboratorije za etaloniranje rezultat obično iskazuju kao proširenu mernu nesigurnost *U* sa faktorom obuhvata *k*=2 za normalnu raspodelu. Ako je deklarisana nesigurnost etaloniranja npr. 0,6 % sa faktorom obuhvata *k*=2, najpre nalazimo 0,6 % od izmerenih 36,6 °C da bismo i ovu nesigurnost izrazili u istim jedinicama °C:

$$\frac{0{,}6}{100} \cdot 36{,}6\ ^\circ\mathrm{C} = 0{,}2196\ ^\circ\mathrm{C}\ \approx\ 0{,}22\ ^\circ\mathrm{C}$$

Pošto je, za dobijanje ove nesigurnosti korišćen faktor obuhvata *k*=2, ovaj broj treba podeliti sa 2 da bi se dobila standardna nesigurnost:

$$u_3 = \frac{0{,}22\ ^\circ\mathrm{C}}{k} = \frac{0{,}22\ ^\circ\mathrm{C}}{2} = 0{,}11\ ^\circ\mathrm{C}$$

4. Nesigurnost koraka displeja odn. rezolucija digitalnog instrumenta je 0,1 °C. Kako je objašnjeno u odeljku 5.3.2, za očitani rezultat 36,6 °C, stvarna vrednost može biti bilo gde između 36,55 °C i 36,65 °C sa jednakom verovatnoćom. Reč je, dakle, o uniformnoj raspodeli sa mogućim opsegom odstupanja ±0,05 °C. Odatle je standardna nesigurnost:

$$u_4 = \frac{0{,}05}{\sqrt{3}} \approx 0{,}03\ °\mathrm{C}$$

Kombinovana standardna nesigurnost se sada može dobiti primenom formule 5.6:

$$u_c = \sqrt{0{,}13^2 + 0{,}12^2 + 0{,}11^2 + 0{,}03^2}\ °\mathrm{C} \approx 0{,}21\ °\mathrm{C}$$

Vidimo da smo doprinos u_4= 0,03 °C mogli zanemariti, jer je mnogo manji od ostalih. Kako je navedeno u odeljku 5.3.1, dobijeni rezultat u_c se može smatrati normalno raspodeljenim, pa se proširena nesigurnost, koja približno odgovara 95% verovatnoći, dobija množenjem faktorom obuhvata *k*=2 prema formuli 5.5:

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 0{,}21\ °\mathrm{C} = 0{,}42\ °\mathrm{C}$$

Rezultat merenja se, tada, može iskazati na sledeći način:

T = 36,6 ± 0,4 °C, *n*=30, *k*=2, norm.

5.5.2. Budžet merne nesigurnosti

Pošto je izračunavanje merne nesigurnosti u realnim situacijama relativno složeno, česta praksa je da se, radi preglednosti, koristi budžet merne nesigurnosti, odn. tabelarni prikaz ovog izračunavanja. Za primer iz prethodnog odeljka, budžet merne nesigurnosti prikazan je u sledećoj tabeli:

Tabela 5.1. Budžet merne nesigurnosti.

Izvor nesigurnosti	Tip	Oznaka	Vrednost [°C]	Raspodela	Delitelj	u [°C]
Ponovljivost	A	u_1	0,13	Norm	1	0,13
Dokumentacija proizvođača	B	u_2	0,2	Unif	√3	0,12
Etaloniranje	B	u_3	0,22	Norm	2	0,11
Rezolucija displeja	B	u_4	0,05	Unif	√3	0,03
Kombinovana nesigurnost u_c [°C]						0,21
Proširena nesigurnost U [°C]						0,42

Formiranje ovakvih tabela i potrebna izračunavanja, jednostavno se i pouzdano mogu vršiti primenom nekog spreadsheet programa, kao što je Microsoft Excel®. Time se smanjuje mogućnost nastanka greške, a iste tabele se mogu koristiti za više izračunavanja sa različitim ulaznim podacima.

5.5.3. Propagacija nesigurnosti

U mnogim slučajevima se tražena veličina ne meri direktno, već se određuje iz drugih izmerenih veličina kroz neku matematičku relaciju. Na primer, za izračunavanje dnevne ekspozicije buci, potrebno je tu ekspoziciju izračunati na osnovu izmerenih nivoa buke i trajanja ekspozicije, koji se zasebno određuju. U takvim slučajevima, za nalaženje kombinovane standardne nesigurnosti koristi se *zakon propagacije nesigurnosti* [36]:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\cdot u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\cdot u(x_2)\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N}\cdot u(x_N)\right)^2} \quad (5.7)$$

gde je $f(x_1,x_2,...,x_N)$ izlazna veličina koja se računa kao funkcija izmerenih ulaznih veličina $x_1,x_2,...,x_N$; u_c je kombinovana standardna nesigurnost izlazne veličine f; $u(x_i)$ su standardne nesigurnosti ulaznih veličina x_i. Parcijalni izvodi $\partial f/\partial x_i$ se nazivaju *koeficijenti osetljivosti*. Formula 5.7 važi

pod pretpostavkom da su doprinosi nesigurnosti međusobno nezavisni odn. da nisu korelisani.

Kako se vidi iz formule, kombinovana nesigurnost se računa na isti način kao i ranije (formula 5.6), ali se svaki doprinos nesigurnosti $u(x_i)$ množi odgovarajućim koeficijentom osetljivosti $c_{xi} = \partial f/\partial x_i$ koji pokazuje koliko se izlazna veličina f menja kada se menja ulazna veličina x_i odnosno koliko je f osetljiva na promene x_i. U tom smislu se ∂f može shvatiti kao promena izlazne veličine f, a ∂x_i kao promena ulazne veličine x_i.

Primer 1. Potrebno je odrediti zapreminu prostorije čija je osnova kvadrat stranice a = 3 m, a visina je h = 4 m. Za određivanje dužine se koristi daljinomer čija je merna nesigurnost U_d = ±0,02 m. Kolika je merna nesigurnost zapremine prostorije?

Zapremina prostorije data je relacijom:

$$V = a^2 h$$

$$V = (3\ m)^2 \cdot 4\ m = 36\ m^3$$

Koeficijenti osetljivosti su:

$$c_a = \frac{\partial V}{\partial a} = 2ah = 24\ m^2$$

$$c_h = \frac{\partial V}{\partial h} = a^2 = 9\ m^2$$

Kombinovana merna nesigurnost, primenom formule 5.7, je:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial a} \cdot u(a)\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h} \cdot u(h)\right)^2}$$

$$u_c = \sqrt{(24 \cdot 0{,}01)^2 + (9 \cdot 0{,}01)^2}\, m^3 = 0{,}256\ \mathrm{m}^3$$

Na ovom mestu treba pripaziti da se „U_d = ±0,02 m“ u specifikacijama daljinomera odnosi na proširenu (95 %) mernu nesigurnost, pa ju je potrebno podeliti sa k=2 da bi se dobila standardna nesigurnost u = 0,01 m koja je korišćena u proračunu iznad.

Proširena merna nesigurnost zapremine prostorije je:

$$U = ku_c = 2 \cdot 0{,}256 \approx 0{,}51\ \mathrm{m}^3$$

Dakle, tražena zapremina je:

$$V = (36 \pm 0{,}51)\ \mathrm{m}^3$$

Primer 2. Merenje gustine snage elektromagnetnog zračenja S u oblasti dalekog polja, vrši se instrumentom koji pokazuje jačinu električnog polja E = 714 mV/m. Proširena nesigurnost E je U_E = ±62 mV/m. Kolika je nesigurnost S?

U oblasti dalekog polja važi relacija [39]:

$$S = \frac{E^2}{377\ \Omega} = \frac{\left(0{,}714\,\frac{V}{m}\right)^2}{377\ \Omega} = 1{,}352 \cdot 10^{-3}\ \frac{W}{m^2} = 1{,}352\ \frac{mW}{m^2}$$

Koeficijent osetljivosti je:

$$\frac{\partial S}{\partial E} = \frac{2E}{377\ \Omega} = 3{,}788 \cdot 10^{-3}\ \frac{A}{m}$$

Nesigurnost S je:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial E} \cdot u(E)\right)^2} = 3{,}788 \cdot 10^{-3} \frac{A}{m} \cdot \frac{0{,}062}{2} \frac{V}{m} \approx 1{,}17 \cdot 10^{-4} \frac{W}{m^2}$$

Proširena nesugurnost:

$$U = ku_c = 2 \cdot 1{,}17 \cdot 10^{-4} \frac{W}{m^2} = 0{,}235 \frac{mW}{m^2} \approx 0{,}24 \frac{mW}{m^2}$$

Gustina snage zračenja je tada:

$$S = (1{,}35 \pm 0{,}24) \frac{mW}{m^2}$$

5.6. Primeri izračunavanja merne nesigurnosti

5.6.1. Merna nesigurnost pri merenju buke

U odeljku 1.6.2, razmatran je primer radionice i strategije ispitivanja buke zasnovane na radnim operacijama odn. zadacima. Prema ISO 9612 [5], izvori merne nesigurnosti koji se moraju uzeti u obzir, uključuju:

- Nesigurnost usled uzorkovanja nivoa buke u toku radne operacije/zadatka $u_{1a,m}$;
- Nesigurnost procene trajanja radne operacije/zadatka $u_{1b,m}$;
- Nesigurnost poreklom od merne opreme u_2 i
- Nesigurnost pozicioniranja mikrofona u_3.

Ukupna merna nesigurnost u izračunatog $L_{EX,8h}$ tada se nalazi primenom formule 5.8 tako što se ovi doprinosi saberu u kvadraturi:

$$u^2 = \sum_{m=1}^{M} \left(c_{1a,m}^2 \left(u_{1a,m}^2 + u_2^2 + u_3^2\right) + c_{1b,m}^2 u_{1b,m}^2\right) \qquad (5.8)$$

Parametar $c_{1a,m}$ je koeficijent osetljivosti koji pokazuje koliko je tražena veličina $L_{EX,8h}$ osetljiva na promene izmerenih vrednosti $L_{eq,m}$, dok $c_{1b,m}$ pokazuje koliko je $L_{EX,8h}$ osetljiva na promene T_m (dužinu trajanja zadatka m).

Standardna nesigurnost nivoa buke za zadatak m, $u_{1a,m}$, usled uzimanja *I* uzoraka, izračunava se primenom sledeće formule [5]:

$$u_{1a,m} = \sqrt{\frac{1}{I(I-1)}\left(\sum_{i=1}^{I}\left(L_{A,eq,m,i} - \bar{L}_{A,eq,m}\right)^2\right)} \qquad (5.9)$$

Posmatrajući Tabelu 1.1 iz odeljka 1.6.2, za radnu operaciju „bušenje“ (zadatak *m*=2) izmereni su nivoi zvučnog pritiska 78,2 dB(A), 80,1 dB(A) i 79,9 dB(A). Aritmetička sredina ova tri nivoa je:

$$\bar{L}_{A,eq,m=2} = 79{,}4\ dB(A)$$

Pošto ima tri uzorka, *I*=3 i odatle nalazimo:

$$u_{1a,m=2} = \sqrt{\frac{1}{3\cdot 2}\left((78{,}2-79{,}4)^2 + (80{,}1-79{,}4)^2 + (79{,}9-79{,}4)^2\right)}$$

$$u_{1a,m=2} = 0{,}603\ dB(A)$$

Na isti način nalazimo merne nesigurnosti za ostale zadatke:

$$u_{1a,m=3} = 0{,}928\ dB(A)$$

$$u_{1a,m=4} = 0{,}524\ dB(A)$$

Za rad bez značajnog izlaganja buci (m=1), usvajamo $u_{1a,m=1}$ = 0 dB(A).

Prema ISO-9612, merna nesigurnost instrumenta klase 1 je u_2= 0,7 dB(A) (Tabela C.5 iz Standarda), dok je merna nesigurnost zbog položaja mikrofona u_3= 1 dB(A) [5].

Kako je objašnjeno u odeljku 5.5.3, koeficijenti osetljivosti $c_{1a,m}$ i $c_{1b,m}$ izračunavaju se kao parcijalni izvodi:

$$c_{1a,m} = \frac{\partial L_{EX,8h}}{\partial L_{eq,m}} = \frac{T_m}{8h} 10^{0,1\cdot\left(L_{eq,m} - L_{EX,8h}\right)} \tag{5.10}$$

$$c_{1b,m} = \frac{\partial L_{EX,8h}}{\partial T_m} = 4{,}34 \cdot \frac{c_{1a,m}}{T_m} \tag{5.11}$$

Za njihovo izračunavanje su potrebni ekvivalentni nivoi po zadacima $L_{eq,m}$. Ranije je, u primeru iz odeljka 1.6.2, izračunato: $L_{eq,m=1}$ = 67 dB(A), $L_{eq,m=2}$ = 79,48 dB(A), $L_{eq,m=3}$ = 89,18 dB(A) i $L_{eq,m=4}$ = 81,53 dB(A). Takođe je izračunato $L_{EX,8h}$= 85,6 dB(A). Odatle se, primenom formule 5.10, dobija:

$$c_{1a,m=1} = 0{,}003$$
$$c_{1a,m=2} = 0{,}062$$
$$c_{1a,m=3} = 0{,}862$$
$$c_{1a,m=4} = 0{,}074$$

Prema ISO-9612 str. 29, nesigurnost procene trajanja zadatka *m* može se računati prema formuli 5.12 [5].

$$u_{1b,m} = 0{,}5 \cdot (T_{max} - T_{min}) \tag{5.12}$$

gde je T_{max} najveće, a T_{min} najmanje trajanje izvršenja posmatranog zadatka.

U posmatranom primeru, dobija se:

$$u_{1b,m=1} = 0{,}5 \cdot (2-1) = 0{,}5$$
$$u_{1b,m=2} = 0{,}5 \cdot (3-1) = 1$$
$$u_{1b,m=3} = 0{,}5 \cdot (4-2) = 1$$
$$u_{1b,m=4} = 0{,}5 \cdot (2-1) = 0{,}5$$

Primenom formule 5.11, na osnovu već izračunatih $c_{1a,m}$, dobijaju se koeficijenti osetljivosti za trajanje zadataka:

$$c_{1b,m=1} = 4{,}34 \cdot \frac{c_{1a,m=1}}{1{,}5} = 0{,}008$$

$$c_{1b,m=2} = 4{,}34 \cdot \frac{c_{1a,m=2}}{2} = 0{,}134$$

$$c_{1b,m=3} = 4{,}34 \cdot \frac{c_{1a,m=3}}{3} = 1{,}247$$

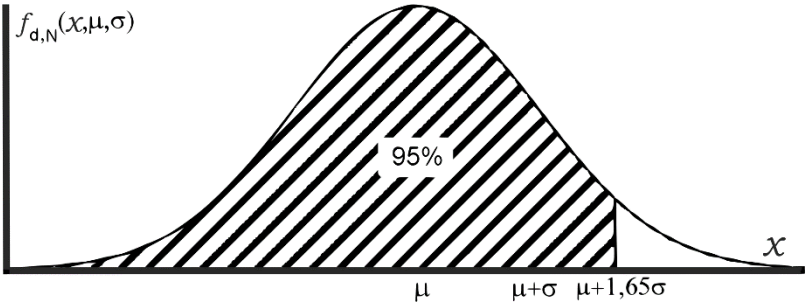
$$c_{1b,m=4} = 4{,}34 \cdot \frac{c_{1a,m=4}}{1{,}5} = 0{,}214$$

Ovde se T_m, dužina trajanja zadatka m, izračunava kao aritmetička sredina snimljenih dužina trajanja posmatranog zadatka.

Pošto su izračunate sve potrebne vrednosti, ukupna merna nesigurnost se sada može dobiti njihovim uvršćavanjem u formulu 5.8. Dobija se u=1,829 dB(A). Proširena merna nesigurnost se izračunava tako što se ova vrednost pomnoži faktorom pokrivanja k = 1,65:

$$U = k \cdot u = 1{,}65 \cdot u \qquad (5.13)$$

Faktor pokrivanja k = 1,65 ima smisao da se 95 % rezultata $L_{EX,8h}$ nalazi ispod vrednosti $L_{EX,8h}+U$, čime obezbeđujemo 95 % pouzdanost da buka ne prelazi nivo $L_{EX,8h}+U$. Ovo je ilustrovano na Slici 5.4.



Slika 5.4. Jednostrana proširena merna nesigurnost.

Za $\mu = L_{EX,8h}$ i $\sigma = u$, približno 95 % rezultata se nalazi u šrafiranoj oblasti, do koje se dolazi integralom $f_{d,N}$ do $\mu+1{,}65\cdot\sigma$. Tako se dobija proširena merna nesigurnost U= 3,02 dB(A).

5.6.2. Merna nesigurnost pri merenju vibracija

U odeljku 2.5.2. prikazan je primer radionice u kojoj se, pri radu, izlaganje vibracijama javlja kod tri glavne radne operacije: bušenje, sečenje i ravnanje. Za navedeni primer će biti izračunata merna nesigurnost dobijenog rezultata A(8). Bušenje se obavlja između 1 h i 3 h tokom osmočasovnog radnog vremena (u proseku 120 min), sečenje 2h do 4 h (u proseku 180 min) a ravnanje 1 h do 2 h (u proseku 90 min). Kako je reč o ručnim vibrirajućim alatima, očekuje se izlaganje vibracijama koje deluju preko šake-ruke, pa se ispitivanje obavlja u skladu sa preporukama ISO 5349 [13, 14]. Za izračunavanje merne nesigurnosti biće korišćene preporuke date u ISO/TS 22704 [40].

5.6.2.1. Merna nesigurnost ubrzanja

Za svaku od identifikovanih radnih operacija (zadataka), prema ISO 5349-2, potrebno je obaviti najmanje tri merenja totalne vrednosti vibracija a_{hv} [14]. Radi kasnije primene potrebnih računskih korekcija, preporučuje se najmanje 5 merenja. Primer rezultata takvih merenja, za Operaciju 1 (bušenje), dat je u sledećoj tabeli:

Tabela 5.2. Rezultati merenja vibracija za radnu operaciju (1) – „Bušenje“.

Broj merenja	1	2	3	4	5
a_{hv} **[m/s²]**	4,78	3,94	5,32	5,12	4,28

Ova tabela je identična sa tabelom 2.2. iz odeljka 2.5.2, ali je ovde ponovo prikazana radi preglednosti i lakšeg praćenja proračuna. Na osnovu ovih podataka izračunavaju se srednja vrednost *M* i standardna devijacija srednje vrednosti *SDM*:

$$M = \overline{a_{hv}} = 4{,}688\ {}^{m}/_{s^2} \approx 4{,}69\ {}^{m}/_{s^2}$$

$$SDM = u_A = \frac{\sigma}{\sqrt{5}} = 0{,}257\ {}^{m}/_{s^2} \approx 0{,}26\ {}^{m}/_{s^2}$$

Srednja vrednost računa se po formuli 5.2, standardna devijacija σ po formuli 5.3, a SDM po formuli 5.4. Oznaka u_A ukazuje na to da je SDM procena merne nesigurnosti tipa A. Na isti način se nalaze srednja vrednost i SDM za preostale dve radne operacije (Tabela 5.3).

Tabela 5.3. Merne nesigurnost tipa A za sve tri radne operacije.

Radna op.	a_{hv} **[m/s²]**	u_A **[m/s²]**	$u_{A,corr}$ **[m/s²]**	$u_{A,corr}$ **[rel]**
Bušenje (1)	4,69	0,26	0,368	0,078
Sečenje (2)	1,61	0,17	0,240	0,149
Ravnanje (3)	2,13	0,24	0,339	0,159

Veličina $u_{A,corr}$ predstavlja u_A korigovanu množenjem Bayes-ovim članom, prema sledećoj formuli:

$$u_{A,corr} = \sqrt{\frac{n-1}{n-3}} \cdot u_A \tag{5.14}$$

gde je n broj ponovljenih merenja (u tekućem primeru n=5). Ova korekcija se primenjuje u skladu sa ISO/TS 22704 kada je broj ponovljenih merenja manji od 30 [40]. Poslednja kolona u Tabeli 5.3 sadrži vrednosti $u_{A,corr}$ izražene kao relativne nesigurnosti (bez jedinice), dobijene deljenjem $u_{A,corr}$ [m/s^2] sa a_{hv} [m/s^2], što je potrebno za izračunavanje kombinovane merne nesigurnosti.

Dobijenu procenjenu mernu nesigurnost tipa A potrebno je iskombinovati sa doprinosima tipa B. Prema ISO/TS 22704, u te doprinose spadaju:

- Instrument u_{ins} = 0,152 [rel]
- Sprezanje pretvarača u_{spr} = 0,029 [rel]
- Pozicija pretvarača u_{poz} = 0,173 [rel]

Vrednost u_{ins} je usvojena u skladu sa zahtevima za mernu instrumentaciju prema ISO 8041-1 [41]. Umesto ove vrednosti se mogu koristititi podaci iz dokumentacije proizvođača opreme. Vrednosti u_{spr} i u_{poz} su preuzete iz ISO/TS 22704 [40].

Kombinovana standardna nesigurnost dobija se na osnovu navedenih procena tipa B i izračunatih nesigurnosti tipa A iz Tabele 5.3, primenom formule 5.6:

$$u_{c,buš} = \sqrt{u_{A,corr,buš}^2 + u_{ins}^2 + u_{spr}^2 + u_{poz}^2} = 0{,}245$$

$$u_{c,seč} = \sqrt{u_{A,corr,seč}^2 + u_{ins}^2 + u_{spr}^2 + u_{poz}^2} = 0{,}276$$

$$u_{c,rav} = \sqrt{u_{A,corr,rav}^2 + u_{ins}^2 + u_{spr}^2 + u_{poz}^2} = 0{,}282$$

Ukoliko se procenjuje nesigurnost na sličnim radnim mestima, prema ISO/TS 22704, potrebno je dodati još i:

- nesigurnost usled različitih operatora opreme u_{op} = 0,087 [rel] i
- nesigurnost usled različitih uslova proizvodnje u_{pr} = 0,046 [rel]

Navedene vrednosti se, prema ISO/TS 22704, mogu koristiti kada nisu na raspolaganju podaci dobijeni merenjem na više ispitanika u konkretnoj situaciji. Tada je kombinovana standardna nesigurnost za radnu operaciju „bušenje“, ponovo primenom formule 5.6:

$$u_{c,buš,rOp} = \sqrt{u_{c,buš}^2 + u_{op}^2 + u_{pr}^2} =$$

$$= \sqrt{0{,}245^2 + 0{,}087^2 + 0{,}046^2} =$$

$$= 0{,}264$$

Dakle, relativna nesigurnost srednje vrednosti ubrzanja, za radnu operaciju „bušenje“, je 26,4 %. Na isti način, za preostale dve radne operacije:

$$u_{c,seč,rOp} = \sqrt{u_{c,seč}^2 + u_{op}^2 + u_{pr}^2} = 0{,}293$$

$$u_{c,rav,rOp} = \sqrt{u_{c,rav}^2 + u_{op}^2 + u_{pr}^2} = 0{,}298$$

Apsolutna standardna nesigurnost u m/s^2 nalazi se množenjem prosečne a_{hv} iz Tabele 5.3 sa odgovarajućom relativnom nesigurnošću:

$$u_{c,buš,rOp} = 0{,}264\ [\text{rel}] \cdot \overline{a_{hv,buš}} = 0{,}264 \cdot 4{,}69 \frac{m}{s^2} = 1{,}238 \frac{m}{s^2}$$

$$u_{c,seč,rOp} = 0{,}293\ [\text{rel}] \cdot \overline{a_{hv,seč}} = 0{,}293 \cdot 1{,}61 \frac{m}{s^2} = 0{,}472 \frac{m}{s^2}$$

$$u_{c,rav,rOp} = 0{,}298\ [\text{rel}] \cdot \overline{a_{hv,rav}} = 0{,}298 \cdot 2{,}13 \frac{m}{s^2} = 0{,}635 \frac{m}{s^2}$$

5.6.2.2. Merna nesigurnost trajanja radne operacije

Ukoliko znamo da radna operacija bušenja traje između 1 h i 3 h, srednje trajanje možemo proceniti kao aritmetičku sredinu:

$$t_{buš} = \frac{t_{min} + t_{max}}{2} = \frac{60\ \text{min} + 3 \cdot 60\ \text{min}}{2} = 120\ \text{min}$$

Isto i za preostale dve radne operacije:

$$t_{seč} = \frac{2 \cdot 60\ \text{min} + 4 \cdot 60\ min}{2} = 180\ \text{min}$$

$$t_{rav} = \frac{60\ \text{min} + 2 \cdot 60\ \text{min}}{2} = 90\ \text{min}$$

Pošto nemamo nikakvu informaciju o raspodeli trajanja, prema ISO/TS 22704, koristićemo uniformnu raspodelu [40]. Formula za standardnu devijaciju za uniformnu raspodelu je:

$$\sigma_u = \frac{b - a}{2\sqrt{3}} \tag{5.15}$$

Odatle, standardne nesigurnosti trajanja radnih operacija izračunavamo na sledeći način:

$$u_{t,buš} = \frac{t_{max} - t_{min}}{2\sqrt{3}} = \frac{3 \cdot 60\ min - 60\ min}{2\sqrt{3}} = 34{,}641\ min$$

$$u_{t,seč} = \frac{4 \cdot 60\ min - 2 \cdot 60\ min}{2\sqrt{3}} = 34{,}641\ min$$

$$u_{t,rav} = \frac{2 \cdot 60\ min - 60\ min}{2\sqrt{3}} = 17{,}321\ min$$

5.6.2.3. Merna nesigurnost dnevne izloženosti vibracijama A(8)

Glavna veličina koju treba proceniti je dnevna izloženost vibracijama. Njena nesigurnost računa se na osnovu do sada nađenih standardnih nesigurnosti ubrzanja i trajanja izlaganja. Koristimo primer iz odeljka 2.5.2, gde je A(8) već izračunata:

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{8 \cdot 60\ min} \cdot \left(a_{hv,buš}^2 t_{buš} + a_{hv,seč}^2 t_{seč} + a_{hv,rav}^2 t_{rav}\right)}$$
$$= 2{,}706\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \approx 2{,}71\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

Najpre je potrebno izračunati koeficijente osetljivosti koji pokazuju koliko promene ubrzanja i vremena izlaganja utiču na A(8). Kako je objašnjeno u odeljku 5.5.3, oni se računaju kao parcijalni izvodi. Za ubrzanja, koristeći podatke iz odeljka 2.5.2:

$$c_{a,buš} = \frac{\partial A(8)}{\partial a_{hv,buš}} = \frac{\frac{1}{8 \cdot 60}\left(2a_{hv,buš} t_{buš}\right)}{2\sqrt{\frac{1}{8 \cdot 60} \cdot \left(a_{hv,buš}^2 t_{buš} + a_{hv,seč}^2 t_{seč} + a_{hv,rav}^2 t_{rav}\right)}}$$

$$= \frac{\frac{1}{8 \cdot 60}\left(2a_{hv,buš} t_{buš}\right)}{2A(8)} = \frac{a_{hv,buš} t_{buš}}{8 \cdot 60 \cdot A(8)} = 0{,}433$$

Na isti način se nalaze koeficijenti osetljivosti za ubrzanje i za operacije sečenja $c_{a,seč}$ = 0,223 i ravnanja $c_{a,rav}$ = 0,148. Treba voditi računa da su ubrzanja izražena u m/s^2, a vremena izlaganja u min.

Sledeći korak je računanje koeficijenata osetljivosti za vreme trajanja radne operacije:

$$c_{t,buš} = \frac{\partial A(8)}{\partial t_{buš}} = \frac{1}{8 \cdot 60} \cdot \frac{a_{hv,buš}^2}{2 \cdot A(8)} = 8{,}468 \cdot 10^{-3}\ \frac{{}^{m}/_{S^2}}{min}$$

Isto tako, za sečenje $c_{t,seč}$ = 9,979·10^{-4} (m/s^2)/min i ravnanje $c_{t,rav}$ = 1,747·10^{-3} (m/s^2)/min.

Na osnovu ovoga, kombinovana nesigurnost za A(8) nalazi se primenom formule 5.7 u koju se uvršćuju do sada izračunate vrednosti:

$$u_{c,A(8)} = (c_{a,buš}^2 u_{c,buš,rOp}^2 + c_{t,buš}^2 u_{t,buš}^2 + \\ + c_{a,seč}^2 u_{c,seč,rOp}^2 + c_{t,seč}^2 u_{t,seč}^2 + \\ + c_{a,rav}^2 u_{c,rav,rOp}^2 + c_{t,rav}^2 u_{t,rav}^2)^{\frac{1}{2}} \\ = 0{,}629 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

Jednostrana proširena merna nesigurnost dobija se, prema ISO/TS 22704, množenjem faktorom obuhvata k = 1,6 za 95 % pokrivenost [40]:

$$U(A(8)) = 1{,}6 \cdot u_{c,A(8)} = 1{,}007 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \approx 1{,}01 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

Konačno, rezultat pišemo u obliku:

$$A(8) = (2{,}71 \pm 1{,}01) \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

Obzirom da je korišćena 95 % pokrivenost, verovatnoća je 95 % da je ispitivana izloženost vibracijama manja ili jednaka 2,71+1,01 m/s^2 = 3,72 m/s^2. Ovu vrednost možemo porediti sa akcionom i graničnom vrednošću izlaganja datim u čl. 4 Pravilnika [11]. Nalazimo da je premašena akciona vrednost izlaganja od 2,5 m/s^2, ali je izlaganje ispod graničnog od 5 m/s^2.

5.6.3. Merna nesigurnost WBGT – korelisane ulazne veličine

Kako je objašnjeno u odeljku 3.3, toplotno opterećenje se može karakterisati WBGT indeksom, koji se računa na osnovu rezultata istovremenog merenja tri veličine: temperature suvog termometra T_a, temperature prirodnog vlažnog termometra T_{nw} i temperature globus-termometra T_g. Zavisno da li se merenja vrše bez ili sa solarnim opterećenjem, WBGT se računa primenom formule 3.2 ili 3.3.

Kako se ove temperature mere istovremeno, često senzorima istog tipa (obično platinski otporni termometar) koji se nalaze fizički blizu jedan drugog, te veličine su u međusobnoj korelaciji [42]. U takvim situacijama, umesto formule 5.7, mora se primeniti **opštija formula, koja uzima u obzir ove korelacije** [36]:

$$(u_c)^2 = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 (u_i)^2 + 2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} \frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i)u(x_j)r(x_i, x_j) \tag{5.16}$$

Uočava se da je prva suma ista kao u formuli 5.7, dok druga, dodatna suma opisuje doprinose kovarijansi $u(x_i, x_j)$ koje potiču od korelisanosti ulaznih veličina. U slučaju WBGT indeksa, ulazne veličine x su navedene tri temperature koje se simultano mere, funkcija f je WBGT indeks, $r(x_i, x_j)$ je koeficijent korelacije ulaznih veličina x_i i x_j (u našem slučaju, dve temperature) a u_c kombinovana nesigurnost.

Izračunavanje merne nesigurnosti WBGT će biti ilustrovano kroz primer ispitivanja u zatvorenoj prostoriji bez direktnog izlaganja sunčevom zračenju. U takvoj situaciji, WBGT se računa prema formuli 3.2, koja je ovde ponovo prikazana radi preglednosti:

$$WBGT_{nsl} = 0{,}7T_{nw} + 0{,}3T_g \tag{3.2}$$

U seriji merenja, dobijeni su rezultati T_a, T_{nw} i T_g. Rezultati T_a nam neće biti potrebni, jer se oni koriste samo u slučaju merenja pri direktnom izlaganju sunčevom zračenju.

Prvi korak je izračunavanje samog WBGT indeksa. Iz serije od npr. n=16 merenja (ukupno 16 rezultata T_{nw} i isto toliko rezultata T_g) izračunavamo srednje vrednosti temperatura, npr. $T_{nw,sr}$ = 21,98 °C i $T_{g,sr}$ = 25,07 °C. To činimo primenom formule 5.2 ili pomoću računara, npr. Excel® funkcijom AVERAGE. Dobijene vrednosti koristimo da nađemo WBGT indeks po formuli 3.2:

$$WBGT_{nsl} = 0{,}7 \cdot 21{,}98\ °\mathrm{C} + 0{,}3 \cdot 25{,}07\ °\mathrm{C} = 22{,}91\ °\mathrm{C}$$

Drugi korak je određivanje mernih nesigurnosti tipa A, koje ćemo označiti sa u_A. Iz serije merenja izračunavamo standardne devijacije σ(T_g) i σ(T_{nw}) primenom formule 5.3 ili npr. Excel® funkcijom STDEV.S. Pošto radimo sa srednjim vrednostima, izračunavamo standardne devijacije srednje vrednosti primenom formule 5.4. Dobijamo:

$$u_A(T_g) = \frac{\sigma(T_g)}{\sqrt{16}} = \frac{0{,}0873}{4} = 0{,}0218\ °C$$

$$u_A(T_{nw}) = \frac{\sigma(T_{nw})}{\sqrt{16}} = \frac{0{,}075}{4} = 0{,}0187\ °C$$

Treći korak je određivanje doprinosa mernoj nesigurnosti tipa B. Iz sertifikata o etaloniranju možemo pročitati npr. da je proširena (k=2) merna nesigurnost $U_B(T_g)$ = 0,4 °C. Odatle je standardna nesigurnost:

$$u_B(T_g) = \frac{0{,}4\ °C}{2} = 0{,}2\ °C$$

Isto tako, za $U_B(T_{nw})$ = 0,24 °C dobijamo $u_B(T_{nw})$ = 0,12 °C.

Četvrti korak je uračunavanje dodatnih izvora merne nesigurnosti koje je ispitivač primetio. Recimo, nesigurnost zbog rezolucije displeja od 0,1 °C obrađuje se kao u primeru u odeljku 5.5.1:

$$u_D = \frac{0{,}05}{\sqrt{3}} = 0{,}0289\ °\text{C}$$

Ako ispitivač identifikuje još izvora nesigurnosti koji su poredivi po uticaju sa ostalim izvorima, na ovom mestu treba da ih uračuna. Dalji proračun ćemo izvršiti pod pretpostavkom da nema dodatnih značajnih izvora nesigurnosti.

Kombinovana nesigurnost se računa po formuli 5.6:

$$u_c(T_g) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2 + u_D^2} = 0{,}2032\ °\text{C}$$

Radi preglednosti, formiramo budžete merne nesigurnosti u obliku tabela:

Tabela 5.4. Budžet merne nesigurnosti za T_g.

Izvor nesigurnosti	**Tip**	**Oznaka**	**Vrednost [°C]**	**Raspodela**	**Delitelj**	**u [°C]**
Serija merenja	A	$u_A(T_g)$	0,0218	Norm	1	0,0218
Sertifikat o etaloniranju	B	$u_B(T_g)$	0,4	Norm	2	0,2
Rezolucija displeja	B	u_D	0,05	Unif	√3	0,0289
Kombinovana nesigurnost [°C]		$u_c(T_g)$				0,2032

Tabela 5.5. Budžet merne nesigurnosti za T_{nw}.

Izvor nesigurnosti	Tip	Oznaka	Vrednost [°C]	Raspodela	Delitelj	u [°C]
Serija merenja	A	$u_A(T_{nw})$	0,0187	Norm	1	0,0187
Sertifikat o etaloniranju	B	$u_B(T_{nw})$	0,24	Norm	2	0,12
Rezolucija displeja	B	u_D	0,05	Unif	√3	0,0289
Kombinovana nesigurnost [°C]		$u_c(T_{nw})$				0,1248

Peti korak je nalaženje koeficijenata osetljivosti, koji će pokazati koliko promene T_{nw} i T_g utiču na WBGT. Kako je objašnjeno u odeljku 5.5.3, ovi koeficijenti se izračunavaju kao parcijalni izvodi, u ovom slučaju funkcije $WBGT_{nsl}$ definisane formulom 3.2:

$$c_{nw} = \frac{\partial WBGT_{nsl}}{\partial T_{nw}} = 0{,}7$$

$$c_g = \frac{\partial WBGT_{nsl}}{\partial T_g} = 0{,}3$$

Kako su ulazne veličine T_{nw} i T_g korelisane, potrebno je izračunati i *koeficijent korelacije*. Najlakši način da se do njega dođe je primenom računara, npr. Excel® funkcije CORREL. Kao argumenti ove funkcije zadaju se serije rezultata merenja T_{nw} i T_g. Dobija se npr.

$$r(T_g, T_{nw}) = 0{,}52$$

Šesti (i poslednji) korak je primena formule 5.16 sa do sada dobijenim međurezultatima, kako bi se došlo do kombinovane nesigurnosti WBGT indeksa. U konkretnom slučaju, ona izgleda ovako:

$$u_c^2(WBGT_{nsl}) = \mathrm{c_{nw}^2} u_c^2(T_{nw}) + \mathrm{c_g^2} u_c^2(T_g) + 2\mathrm{c_{nw}c_g} u_c(T_{nw}) u_c(T_g) r(T_g, T_{nw})$$

$$u_c(WBGT_{nsl}) = 0{,}1298\ ℃$$

Proširena (k=2) nesigurnost je tada:

$$U_c(WBGT_{nsl}) = 2u_c(WBGT_{nsl}) = 0{,}2596\ ℃ \approx 0{,}26\ ℃$$

Konačni rezultat se može prikazati u obliku:

$$WBGT = (22{,}91 \pm 0{,}26)\ ℃$$

5.6.3.1. Nesigurnost WBGT pri direktnom solarnom zračenju

Kako je objašnjeno u odeljku 3.3, u slučaju izlaganja direktnom toplotnom zračenju Sunca, koristi se formula 3.3:

$$WBGT_{sl} = 0{,}7T_{nw} + 0{,}2T_g + 0{,}1T_a \qquad (3.3)$$

Prisustvo dodatne ulazne veličine T_a tada u određenoj meri komplikuje proračun. U prvom koraku, WBGT se računa po formuli 3.3. U drugom i trećem koraku je potrebno dodatno odrediti u_A i u_B za temperaturu suvog termometra T_a. Formira se dodatna tabela − budžet merne nesigurnosti za T_a. U petom koraku, koeficijenti osetljivosti su:

$$\mathrm{c_{nw}} = \frac{\partial WBGT_{sl}}{\partial T_{nw}} = 0{,}7$$

$$\mathrm{c_g} = \frac{\partial WBGT_{sl}}{\partial T_g} = 0{,}2$$

$$\mathrm{c_a} = \frac{\partial WBGT_{sl}}{\partial T_a} = 0{,}1$$

Umesto jednog, potrebno je naći tri koeficijenta korelacije, za svaki par temperatura. U poslednjem koraku, formula 5.16 izgleda ovako:

$$u_c^2(WBGT_{sl}) = c_{nw}^2 u_c^2(T_{nw}) + c_g^2 u_c^2(T_g) + c_a^2 u_c^2(T_a) + 2c_{nw}c_g u_c(T_{nw}) u_c(T_g) r(T_{nw}, T_g) + 2c_a c_g u_c(T_a) u_c(T_g) r(T_a, T_g) + 2c_{nw}c_a u_c(T_{nw}) u_c(T_a) r(T_{nw}, T_a)$$

Primer ovakvog proračuna, sa konkretnim izmerenim vrednostima, može se naći u literaturi [42].

Bibliografija

[1] D. Š. Pavlović i M. Mijić, Elektroakustika, Beograd: Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2017.

[2] International Organization for Standardization, „ISO 226:2023 Acoustics — Normal equal-loudness-level contours," ISO, 2023.

[3] T. South, „Managing Noise and Vibration at Work," Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington, 2004.

[4] Vlada Srbije, „Pravilnik o preventivnim merama za bezbedan i zdrav rad pri izlaganju buci," Sl. glasnik RS, 2019.

[5] International Organization for Standardization, „ ISO 9612:2009 Acoustics — Determination of occupational noise exposure — Engineering method," ISO, 2009.

[6] European Parliament and the Council, „Directive 2003/10/EC," Official Journal of the European Union, 2003.

[7] International Organization for Standardization, „ ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration," ISO, 1997.

[8] S. Janković, Metode ispitivanja zdravstvenih efekata mehaničkih vibracija u radnoj sredini (doktorska disertacija), Beograd: Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2009.

[9] S. Janković i Z. Pejović, „Obrada signala vibracija prema savremenim ISO preporukama," *Svet Rada,* t. 1, pp. 33-45, 2004.

[10] S. Janković i Z. Pejović, „Ispitivanje uticaja vibracija na humane subjekte primenom Mathcad paketa," u *Zbornik radova, XIX Konferencija "Buka i vibracije"*, Niš, 2004.

[11] Vlada Srbije, „Pravilnik o preventivnim merama za bezbedan i zdrav rad pri izlaganju vibracijama," Sl. glasnik RS, 2019.

[12] Bruel & Kjaer, „Human Vibration Analyzer Type 4447 User Manual," Bruel & Kjaer, Naerum, 2009.

[13] International Organization for Standardization, „ ISO 5349-1:2001 Mechanical vibration — Measurement and evaluation of human

exposure to hand-transmitted vibrationPart 1: General requirements," ISO, 2001.

[14] International Organization for Standardization, „ ISO 5349-2:2001 Mechanical vibration — Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibrationPart 2: Practical guidance for measurement at the workplace," ISO, 2001.

[15] L. M. Biga, S. Bronson, S. Dawson, A. Harwell, R. Hopkins, J. Kaufmann, M. LeMaster, P. Matern, K. Morrison-Graham, K. Oja, D. Quick i J. Runyeon, „Energy and Heat Balance," Oregon State University, 2019. [Na mreži]. Available: https://open.oregonstate.education/aandp/chapter/24-6-energy-and-heat-balance/. [Poslednji pristup 2023].

[16] „Water - Heat of Vaporization vs. Temperature," The Engineering ToolBox, 2010. [Na mreži]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d_1573.html. [Poslednji pristup 2023].

[17] International Organization for Standardization, „ISO 7726:1998 Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities," ISO, 1998.

[18] A. Chen, J. Zhu, Q. Lin i W. Liu, „A Comparative Study of Forehead Temperature and Core Body Temperature under Varying Ambient Temperature Conditions," *Int. J. Environ. Res. Public Health,* t. 19, br. 23, 2022.

[19] K. Parsons, „Heat Stress Standard ISO 7243 and Its Global Application," *Industrial Health,* t. 44, pp. 368-379, 2006.

[20] International Organization for Standardization, „ISO 7243:2017 Ergonomics of the thermal environment — Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index," ISO, 2017.

[21] International Organization for Standardization, „ISO 7933:2004 Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain," ISO, 2004.

[22] International Organization for Standardization, „ISO 9920:2007 Ergonomics of the thermal environment — Estimation of thermal

insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble," ISO, 2007.

[23] Y. Zhang, Y. Xinxiao, L. Chen i G. Jia, „Comparison of the partitioning of evapotranspiration – numerical modeling with different isotopic models using various kinetic fractionation coefficients," *Plant Soil,* t. 430, p. 307–328, 2018.

[24] „Moist Air - Relative Humidity," The Engineering ToolBox, 2004. [Na mreži]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/relative-humidity-air-d_687.html. [Poslednji pristup 2023].

[25] P. O. Fanger, Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering, Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.

[26] International Organization for Standardization, „ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria," ISO, 2005.

[27] Vlada Srbije, „Pravilnik o preventivnim merama za bezbedan i zdrav rad na radnom mestu," Sl. glasnik RS, 2019.

[28] Vlada Srbije, „Pravilnik o načinu i postupku procene rizika na radnom mestu i u radnoj okolini," Sl. glasnik RS, 2015.

[29] Uprava za bezbednost i zdravlje na radu Republike Srbije, „Smernice za bezbedan i zdrav rad na otvorenom pri visokim temperaturama," Uprava za bezbednost i zdravlje na radu Republike Srbije, 2013.

[30] Vlada Srbije, „Pravilnik o preventivnim merama za bezbedan i zdrav rad pri izlaganju veštačkim optičkim zračenjima," Sl. glasnik RS, 2021.

[31] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, „ICNIRP guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation)," ICNIRP, 2004.

[32] P. Vecchia, M. Hietanen, B. E. Stuck, E. van Deventer i S. Niu, „Protecting Workers from Ultraviolet Radiation," ICNIRP, 2007.

[33] Institut za standardizaciju Srbije, „SRPS EN 14255-1:2012 Merenje i vrednovanje izloženosti lica nekoherentnom optičkom zračenju —

Deo 1: Zračenje ultraljubičastih talasa koje emituju veštački izvori na radnom mestu," ISS, 2012.

[34] Institut za standardizaciju Srbije, „SRPS EN 14255-2:2012 Merenje i vrednovanje izloženosti lica nekoherentnom optičkom zračenju — Deo 2: Zračenje vidljivih i infracrvenih talasa koje emituju veštački izvori na radnom mestu," ISS, 2012.

[35] International Light Technologies, „Measurement Geometries (Chapter 7)," [Na mreži]. Available: https://internationallight.com/measurement-geometries-chapter-7-light-measurement-tutorial. [Poslednji pristup 2023].

[36] BIPM, IEC, „Evaluation of measurement data—guide for the expression of uncertainty in measurement," JCGM, 2008.

[37] I. Leito, L. Jalukse i I. Helm, „The Normal distribution," University of Tartu, 2023. [Na mreži]. Available: https://sisu.ut.ee/measurement/31-normal-distribution/. [Poslednji pristup 2023].

[38] R. Hogan, „Probability Distributions for Measurement Uncertainty," ISOBUDGETS LLC, 2023. [Na mreži]. Available: https://www.isobudgets.com/probability-distributions-for-measurement-uncertainty/. [Poslednji pristup 2023].

[39] U.S. Occupational Safety and Health Administration, „Electromagnetic Radiation: Field Memo," OSHA Cincinnati Laboratory, 1990. [Na mreži]. Available: https://www.osha.gov/radiofrequency-and-microwave-radiation/electromagnetic-field-memo. [Poslednji pristup 2023].

[40] International Organization for Standardization, „ISO/TS 22704:2022 Mechanical vibration — Uncertainty of the measurement and evaluation of human exposure to vibration," ISO, 2022.

[41] International Organization for Standardization, „ISO 8041-1:2017 Human response to vibration — Measuring instrumentationPart 1: General purpose vibration meters," ISO, 2017.

[42] S. Janković, B. Vulević i J. Đoković, „Estimation of Uncertainty in Wet Bulb Globe Temperature Measurements," *International Journal of Thermophysics,* t. 44, br. 138, 2023.